

## کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) در بهره‌برداری بهینه از مخزن (مطالعه‌ی موردی مخزن کارون ۴)

سید محمد حسینی موغاری<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ‌حداد<sup>۲</sup>  
تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۵

### چکیده

امروزه با افزایش نیازهای آبی، تعادلی بین عرضه و تقاضای آب در اکثر مناطق کشور وجود ندارد. از این‌رو، مدیریت صحیح آب و استفاده بهینه از منابع آب موجود، امری اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در این زمینه می‌تواند مفید واقع شود. روش‌های بهینه‌سازی تکاملی از جمله روش‌های مورد نظر در این زمینه می‌باشند که عملکرد مناسب آنها بسیار گزارش شده است. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) الگوریتم تکاملی جدیدی است، که عملکرد و کارایی آن در چندین مسئله بهینه‌سازی به اثبات رسیده است. هدف از این پژوهش بررسی کارایی BBO برای اولین بار در مدیریت منابع آب است. ابتدا BBO در یافتن نقاط بهینه برای سه تابع معیار در بهینه‌سازی، شامل تابع کره، روزنبراک و بوکین ۶ مورد استفاده قرار گرفت، سپس از BBO در بهره‌برداری بهینه از مخزن کارون ۴ با هدف برقرایی بهره‌برداری گردید. به منظور ارزیابی کارایی BBO، از الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) نیز در این مسائل استفاده شد. نتایج مربوط به توابع معیار نشان دادند که BBO در یافتن نقاط بهینه هر سه تابع بهتر از GA عمل نموده، و با دقت بالایی به جواب بهینه نزدیک شده است. در بهره‌ورری از مخزن کارون ۴ نیز نتایج حاکی از کارایی BBO در استخراج سیاست‌های بهینه بهره‌برداری بود، به نحوی که مقدار تابع هدف حاصل از BBO در بهترین عملکرد برابر با ۱/۲۲۳، و برای GA برابر با ۱/۵۳۵ به‌دست آمده است. همچنین، جواب بهینه مطلق حاصل از NLP برای این مسئله ۱/۲۱۳ بوده است.

**کلمات کلیدی:** الگوریتم‌های تکاملی، بهینه‌سازی، بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، بهره‌برداری از مخزن.

<sup>۱</sup> نامزد دکتری مهندسی منابع آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

[Hosseini\\_sm@ut.ac.ir](mailto:Hosseini_sm@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

## مقدمه

کمبود بارش‌های جوی در بسیاری از مناطق جهان در سال‌های اخیر باعث کاهش منابع آب، به خصوص منابع آب سطحی گردیده است. کاهش بارش به هر دلیلی که باشد، چه نوسان‌های اقلیمی و چه تغییر اقلیم، قابل اداره کردن نیست؛ بنابراین چاره‌ای به جز سازش با شرایط موجود وجود ندارد. از طرفی، رشد جمعیت، نیاز به تولید مواد غذایی بیشتری را با منابع آب محدود سبب می‌گردد. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های علمی مناسب تخصیص بهینه‌ی آب به منظور به حداقل رساندن آسیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بهره‌برداری از مخزن یکی از قسمت‌های عمده‌ی مدیریت منابع آب را به خود اختصاص می‌دهد؛ به همین دلیل، توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است. روش‌های مورد استفاده در این زمینه را می‌توان به‌طور کلی در دو گروه تقسیم نمود. گروه اول روش‌های سنتی هستند، این گروه، روش‌های برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> (LP)، برنامه‌ریزی پویا<sup>۲</sup> (DP)، برنامه‌ریزی پویای تصادفی<sup>۳</sup> (SDP) و برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۴</sup> (NLP) را شامل می‌شود. گروه دوم روش‌های تکاملی<sup>۵</sup> (MAS) می‌باشند که الگوریتم ژنتیک<sup>۶</sup> (GA) یکی از مطرح‌ترین آنها است.

در زمینه استفاده از روش‌های سنتی در بهره‌برداری بهینه از مخزن، ریول و همکاران (۱۹۶۹) از LP برای استخراج قواعد بهره‌برداری از یک سامانه یک مخزنه استفاده کردند، آنها میزان خروجی از مخزن را در هر ماه تنها به حجم مخزن مرتبط ساختند و قواعد خطی بهره‌برداری را برای هر ماه ارائه نمودند. ایشان بیان کردند روش LP در عین سادگی دارای دقت مناسبی می‌باشد. موسوی و همکاران (۲۰۰۵) از DP و بر مبنای منطق فازی اقدام به استخراج قواعد بهره‌برداری برای دو مخزن کارون و دز کردند. نتایج آنها نشان دادند که قواعد بهره‌برداری حاصل به خوبی می‌توانند عدم قطعیت موجود را شبیه‌سازی نمایند. کارآموز و هوک (۲۰۰۷) عملکرد DP و SDP را در

بهره‌برداری بهینه از مخزن مورد مقایسه قرار دادند. آنها این شبیه‌ها را برای ۱۲ مورد مختلف، که متشکل از سه مخزن با چهار ظرفیت مختلف بود، اجرا کردند. این مخازن شامل آبگیر رود گانپادر، اوساک و بلک‌اسمیت بودند. نتایج نشان داد که DP برای مخازن با حجم متوسط و بزرگ قواعد بهره‌برداری مناسبی را نتیجه می‌دهد، در حالی که SDP برای مخازن کوچک مناسب‌تر از DP عمل می‌کند.

از الگوریتم‌های تکاملی در بهره‌برداری بهینه از مخازن بسیار استفاده شده است. عمادی و همکاران (۱۳۹۱) به بهره‌برداری از سد مخزنی درودزن با استفاده از الگوریتم بازپخت<sup>۷</sup> (SA) پرداختند. ایشان همچنین از شبیه‌آبدهی و سیاست بهره‌برداری ملاک<sup>۸</sup> (SOP) نیز استفاده کردند. آنها در نتایج خود بیان کردند که SA و شبیه‌آبدهی کارایی بهتری نسبت به SOP دارند، و هر کدام به ترتیب کمبود را ۳۳/۷۴ و ۸۲/۸۶ درصد کاهش می‌دهند. جنت رستمی و همکاران (۱۳۸۹) به بهره‌برداری بهینه از مخزن دز با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح‌شده<sup>۹</sup> (IHS) پرداختند. آنها نتایج IHS را با NLP مقایسه و بیان کردند که روش IHS دارای برتری است. فلاح مهدی‌پور و بزرگ‌حداد (۱۳۹۰) با استفاده از PSO چندهدفه به بهره‌برداری چندمنظوره از مخزن بازفت پرداختند. آنها دستاوردهای خود را با نتایج حاصل از NLP مقایسه نموده و بیان کردند که PSO با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP، توانایی بالایی در ارائه جواب‌های بهینه دارد.

کومار و ردی (۲۰۰۶) به مقایسه عملکرد ACÖ در مقابل GA در یک مسئله بهره‌برداری از مخزن با سه هدف کشاورزی، برقایی و مهار سیلاب پرداختند. مخزن مورد مطالعه آنها آبگیر هیراکد در هند بود. نتایج حاکی از کارایی ACO نسبت به GA هم از نظر دقت و هم از نظر سرعت اجرا بود؛ به نحوی که ACO بیش از دو برابر سریع‌تر از GA عمل کرده است. جوتیپراکاش و شانتی (۲۰۰۶) استفاده از GA سیاست‌های بهینه‌ی بهره‌برداری از سامانه

<sup>۱</sup>simulated annealing

<sup>۲</sup>standard operating policy

<sup>۳</sup>improved harmony search

<sup>۴</sup>particle swarm optimization

<sup>۵</sup>ant colony optimization

<sup>۱</sup>linear programing

<sup>۲</sup>dynamic programing

<sup>۳</sup>stochastic dynamic programing

<sup>۴</sup>non-linear programing

<sup>۵</sup>metaheuristic algorithms

<sup>۶</sup>genetic algorithm

مهدی‌پور و همکاران (۲۰۱۲) از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و GA در تدوین قواعد بهره‌برداری به‌هنگام برای سد کرج استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که قواعد بهره‌برداری حاصل از GP نسبت به بهترین قاعده بهره‌برداری خطی GA، مقدار تابع هدف را ۱۲/۳۹ درصد بهبود می‌بخشد.

الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی<sup>۴</sup> (BBO) الگوریتمی تقریباً جدیدی است که، عملکرد مناسب آن به وسیله‌ی برخی محققین در زمینه‌های مختلف گزارش شده است. جامونا و سوارپ (۲۰۱۱) الگوریتم BBO را در بهینه‌سازی طراحی یک سامانه‌ی قدرت به کار بردند. در این مسئله آنها عملکرد BBO را در کنار چند الگوریتم دیگر مورد مقایسه قرار دادند. این الگوریتم‌ها شامل: الگوریتم جستجوی ممنوعه قطعی<sup>۵</sup> (GTS)، الگوریتم جستجوی ممنوعه تصادفی<sup>۶</sup> (STS)، الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده<sup>۷</sup> (SA)، نسخه‌ی ویرایش شده‌ی الگوریتم ژنتیک<sup>۸</sup> (RGA) و روش تصادفی ژنتیک ترکیبی<sup>۹</sup> (HGS) بودند. نتایج حاکی از کارایی و عملکرد مناسب BBO بودند، به گونه‌ای که عملکرد BBO از تمامی روش‌های دیگر بهتر بوده است. سیمون و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم BBO و GA بر مبنای ۱۴ تابع معیار پرداختند. ایشان ۱۴ تابع معیار را در ابعاد مختلف پنج، ده و بیست بعد به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. نتایج نشان دادند که BBO توانایی بالاتری را در همگرایی به جواب بهینه‌ی مطلق نسبت به الگوریتم GA دارد. همچنین، با افزایش ابعاد مسئله‌ی بهینه‌سازی درصد موفقیت BBO در دستیابی به جواب بهینه افزایش یافته است، به گونه‌ای که در حل مسئله در ۵ بعد ۵۲ درصد مواقع توابع BBO عملکرد بهتری داشته و در حل مسئله در ۱۰ بعد و ۲۰ بعد به ترتیب ۹۰ و ۹۲ درصد مواقع BBO قوی‌تر از GA ظاهر شده است. حدیدی و نظری (۲۰۱۳) در تحقیق خود از الگوریتم BBO برای بهینه‌سازی طراحی لوله‌های مبدل حرارتی استفاده کردند. آنها از این روش برای کمینه‌سازی کل هزینه تجهیزات، از جمله سرمایه‌گذاری و مجموع هزینه‌های سالانه‌ی کارمیه مربوط به لوله‌های مبدل

تکم‌مخزنه پچیپرای را در هند با در نظر گرفتن اطمینان-پذیری‌های مختلف استخراج نمودند. آنها در تحقیق خود در مورد فراسنج‌های GA تحلیل حساسیت انجام دادند. نتایج نشان دادند که مقدار بهینه‌ی نرخ ترکیب<sup>۱</sup> عامل مهم در بهبود عملکرد GA است. افشار و همکاران (۲۰۰۷) بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل<sup>۲</sup> (HBMO) را برای بهره‌برداری بهینه از مخزن دز مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاکی از کارایی و عملکرد بسیار مناسب HBMO در همگرایی به جواب بهینه‌ی مطلق بودند؛ به نحوی که مقدار تابع هدف حاصل از NLP برای این مسئله برابر با ۰/۷۹۶، و برای HBMO برابر با ۰/۸۲۳۶ به دست آمده است.

حداد و همکاران (۲۰۰۸) از HBMO برای طراحی و بهره‌برداری از یک سامانه‌ی تک‌مخزنه و یک سامانه‌ی چندمخزنه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها استفاده کردند. آنها در کنار HBMO از روش NLP نیز بهره‌برداری کردند. نتایج نشان دادند که روش NLP توانایی حل مسئله مربوط به سامانه چندمخزنه را ندارد، اما روش HBMO به خوبی به جواب بهینه همگرا می‌شود. چانگ و چانگ (۲۰۰۹) به بهره‌برداری چندهدفه از سامانه‌ی دو مخزنه‌ی فیتسوی و شیمون در شمال تایوان با استفاده از نسخه‌ی دوم GA پرداختند. نتایج نشان دادند که بهره‌برداری چندهدفه از این مخازن کمبود را به میزان ۱۰ درصد بهبود می‌بخشد. زهرایی و حسینی (۲۰۰۹)، با استفاده از GA اقدام به بهره‌برداری بهینه از مخزن زاینده‌رود کردند. پس از مشخص شدن خروجی‌های بهینه از وایازی سنتی و فازی برای استخراج قواعد بهره‌برداری استفاده کردند. آنها از دو نوع تابع عضویت متقارن و غیرمتقارن در وایازی فازی خود بهره بردند. ایشان در نتایج خود بیان کردند که شبیه‌سازی با تابع عضویت غیرمتقارن دارای عملکرد بهتری نسبت به دو شبیه دیگر است. نتایج با در نظر گرفتن سه نمایشنامه انجام شد. اختلاف بهترین و بدترین عملکرد وایازی فازی با عضویت غیرمتقارن در این سه نمایشنامه بر اساس سه شاخص ضریب همبستگی، ضریب کارایی و خطای ملاک به ترتیب برابر با ۱۵، ۵۴ و ۲۰ درصد بوده است. فلاح

<sup>۴</sup>stochastic tabu search

<sup>۵</sup>simulated annealing

<sup>۶</sup>redefined genetic algorithm

<sup>۷</sup>hybrid genetic stochastic

<sup>۱</sup>crossover

<sup>۲</sup>honey-bee mating optimization

<sup>۳</sup>genetic programming

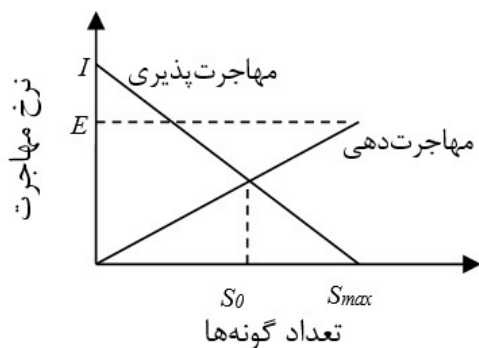
<sup>۴</sup>biogeography based optimization

<sup>۵</sup>deterministic tabu search

و برعکس زیستگاه‌هایی با HSI پایین تعداد گونه‌های کمتری را دربرمی‌گیرند. با افزایش HSI در یک زیستگاه، و افزایش تعداد گونه‌ها، تمایل به مهاجرت از آن زیستگاه به منظور جستجوی زیستگاهی با اندوخته‌ی غذایی بهتر و جمعیت کمتر، افزایش می‌یابد. از طرفی، زیستگاه‌هایی با جمعیت کمتر تمایل به مهاجرت‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند. شکل ۱ تاثیر تعداد گونه‌ها در نرخ مهاجرت‌پذیری ( $\lambda$ ) و نرخ مهاجرت‌دهی ( $\mu$ ) را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱ بیشینه‌ی مهاجرت به زیستگاه زمانی است که هیچ گونه‌ای در زیستگاه وجود ندارد. با افزایش تعداد گونه‌ها، زیستگاه شلوغ‌تر شده و ممکن است گونه‌های کمتری به آنجا مهاجرت کنند، و  $\lambda$  کاهش می‌یابد. نقطه‌ای که در آن زیستگاه دارای بیشینه‌ی تعداد نمونه ( $S_{max}$ ) است، نقطه‌ای با مهاجرت‌پذیری صفر خواهد بود. با توجه به نمودار مهاجرت‌پذیری، مشخص است که اگر هیچ گونه‌ای در زیستگاه وجود نداشته باشد،  $\mu$  صفر است، و با افزایش تعداد گونه‌ها این نرخ افزایش می‌یابد. بیشینه‌ی  $\mu$ ،  $E$  و بیشینه‌ی  $\lambda$ ،  $I$  می‌باشد؛ تعادل تعداد گونه‌ها زمانی است که  $\mu$  و  $\lambda$  برابر باشند،  $S_0$  محل این تعادل را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن  $n=S_{max}$ ، و با توجه به شکل ۱ می‌توان  $\lambda$  و  $\mu$  را در زمانی که در زیستگاه  $k$  گونه وجود دارد به صورت زیر بیان کرد:



شکل ۱- شبیه مهاجرت‌دهی و مهاجرت‌پذیری گونه‌ها در یک زیستگاه.

حرارتی با تغییر متغیرهای مختلف طراحی مثل طول لوله، قطر بیرونی لوله و غیره استفاده کردند. مقایسه‌ی دستاوردهای الگوریتم BBO با نتایج به‌دست آمده به وسیله محققان دیگر، برتری الگوریتم در کاهش هزینه‌ها در تمام مثال‌ها با شرایط عملیاتی مشابه و کاهش زمان اجرای برنامه را نشان داد؛ به نحوی که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری تا ۱۴ درصد کاهش یافت.

بهره‌برداری بهینه از مخازن با توجه به کمبود آب، افزایش نیازها و هزینه‌های کلان طرح‌های آبی مسئله مهمی است که اهمیت آن بر هیچ‌کس پوشیده نیست. میزان رهاسازی از مخزن با توجه به شرایط موجود، و بیشینه کردن سود حاصل از آن، قطعاً مسئله‌ای پیچیده است، که بایستی به صورت حساب شده و دقیق مورد بررسی قرار گیرد. یکی از روش‌های بهینه‌سازی کارآمد در این زمینه MAS می‌باشند، که توانمندی و قدرت آن‌ها در این زمینه به اثبات رسیده است. از این‌رو، استفاده از الگوریتم‌هایی که بتوانند، هرچند جزئی، شرایط را بهبود دهند، حجم قابل توجهی از هزینه‌ها یا کمبودها را کاهش خواهند داد. بدین منظور در این تحقیق قدرت و عملکرد BBO برای اولین بار در بهره‌برداری بهینه از مخزن مورد بررسی قرار گرفته است.

## بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)

### مبانی نظری

جغرافیای زیستی علم مطالعه‌ی پراکندگی جغرافیای موجودات زنده است. شبیه‌های ریاضی جغرافیای زیستی چگونگی مهاجرت یک گونه از یک زیستگاه<sup>۱</sup> به زیستگاه دیگر، و به‌وجود آمدن یا انقراض یک گونه را توصیف می‌کنند. زیستگاه‌هایی که برای اقامت گونه‌های زیستی مناسب‌تر هستند، شاخص شایستگی زیستگاه (HSI) بالاتری دارند. HSI به عواملی مانند پوشش گیاهی، بارش، مساحت، دما و ... بستگی دارد. متغیرهای مشخص‌کننده‌ی کیفیت محل سکونت، متغیرهای شاخص شایستگی<sup>۲</sup> (SIV) نامیده می‌شوند. در واقع SIVها متغیرهایی مستقل بوده و HSI متغیر وابسته به SIVها است. زیستگاه‌هایی با HSI بالا تعداد گونه‌های بیشتری را در خود جای می‌دهند

<sup>۱</sup>emigration

<sup>۲</sup>immigration

<sup>۱</sup>habitat

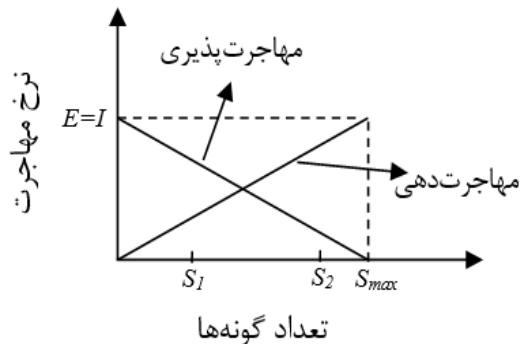
<sup>۲</sup>habitat suitability index

<sup>۳</sup>suitability index variable

اصلاح هر راه‌حل با میزان مناسب بودن HSI آن رابطه‌ای معکوس دارد. انتخاب راه‌حل اصلاح‌کننده بر اساس احتمال متناسب با نرخ مهاجرت‌دهی انجام می‌گیرد؛ در این زمینه می‌توان از چرخ رولت استفاده کرد. انتقال SIVها به طور کاملاً مشابه از یک راه‌حل به راه‌حلی دیگر شاید مناسب به نظر نرسد، چه، باعث عدم جستجوی کامل فضای تصمیم می‌گردد، بنابراین، بهتر است از رابطه‌ی زیر برای جایگزین کردن SIVهای استفاده شود:

$$SIV_{i,k}^{new} = SIV_{i,k} + \alpha(SIV_{j,k} - SIV_{i,k}) \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق،  $SIV_{i,k}^{new}$  = kامین SIV اصلاح شده راه‌حل  $SIV_{i,k}$  = kامین SIV راه‌حل نام (راه‌حل اصلاح‌شونده)،  $SIV_{j,k}$  = kامین SIV راه‌حل زام (راه‌حل اصلاح‌کننده) و  $\alpha$  = فراسنجی است بین صفر و یک که به وسیله‌ی کاربر مشخص می‌شود.



شکل ۲- مقایسه دو راه‌حل برای یک مسئله،  $S_1$  راه‌حل ضعیف و  $S_2$  راه‌حل مناسب.

بلاپای بزرگ نظیر بیماری، فجایع طبیعی و ... به شدت می‌توانند HSI یک زیستگاه را تغییر دهند؛ بنابراین به صورت ناگهانی ممکن است وضعیت یک زیستگاه مناسب یا نامساعد شود. در واقع، این پدیده همانند جهش در GA است. این جهش بعد از مهاجرت (گام قبل) به صورت تصادفی می‌تواند در مورد راه‌حل‌ها اعمال شود. جهش می‌تواند بر اساس یک توزیع احتمالی، مانند توزیع یکنواخت یا زنگوله‌ای، در مورد SIVها بعد از انجام مهاجرت اعمال گردد. بنابر آنچه گفته شد شکل ۳ روندنمای این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$\mu_k = E \frac{k}{n} \quad (1)$$

$$\lambda_k = I \left( I - \frac{k}{n} \right) \quad (2)$$

که در آنها،  $\mu_k$  و  $\lambda_k$  به ترتیب نرخ مهاجرت‌دهی و مهاجرت‌پذیری در یک زیستگاه با k گونه است. در شرایط خاص می‌توان  $\lambda_k + \mu_k = E = I$  را در نظر گرفت.

### مبانی عملی

سیمون (۲۰۰۸) با بهره‌گیری از اندیشه‌ی جغرافیای زیستی در طبیعت، الگوریتمی تحت عنوان BBO ارائه نمود. فرض کنید یک مسئله و جمعیتی از راه‌حل‌های ممکن وجود دارد. هر راه‌حل را می‌توان به عنوان یک زیستگاه در نظر گرفت، که متغیرهای تصمیم در آن همان SIVها می‌باشند (زیستگاه همانند کروموزوم و SIV همانند ژن در GA می‌باشد). همان‌طور که در پیش گفته شد، SIVها میزان HSI یک زیستگاه را تعیین می‌کنند و هر زیستگاه که HSI بیشتری را داشته باشد، زیستگاه مناسب‌تری خواهد بود. در واقع، HSI همان تابع هدف در سایر الگوریتم‌های است. فرض کنید برای هر راه‌حل (زیستگاه) یک نمودار مخصوص با  $E=I$  به صورت شکل ۲ وجود دارد، و تعداد گونه‌ها (S) که رابطه‌ی مستقیمی را با HSI دارند، به وسیله‌ی مقدار HSI جلوه می‌کنند.  $S_1$  در شکل ۲ راه‌حلی با HSI پایین و  $S_2$  معرف راه‌حلی با HSI بالاست.  $S_1$  معرف زیستگاهی است با گونه‌های کم در حالی که تعداد گونه‌ها در زیستگاه  $S_2$  بیشتر است.  $\lambda_1$  برای  $S_1$  از  $\lambda_2$  برای  $S_2$  بزرگتر خواهد بود. همچنین،  $\mu_1$  برای  $S_1$  کوچک‌تر از  $\mu_2$  برای  $S_2$  می‌باشد.

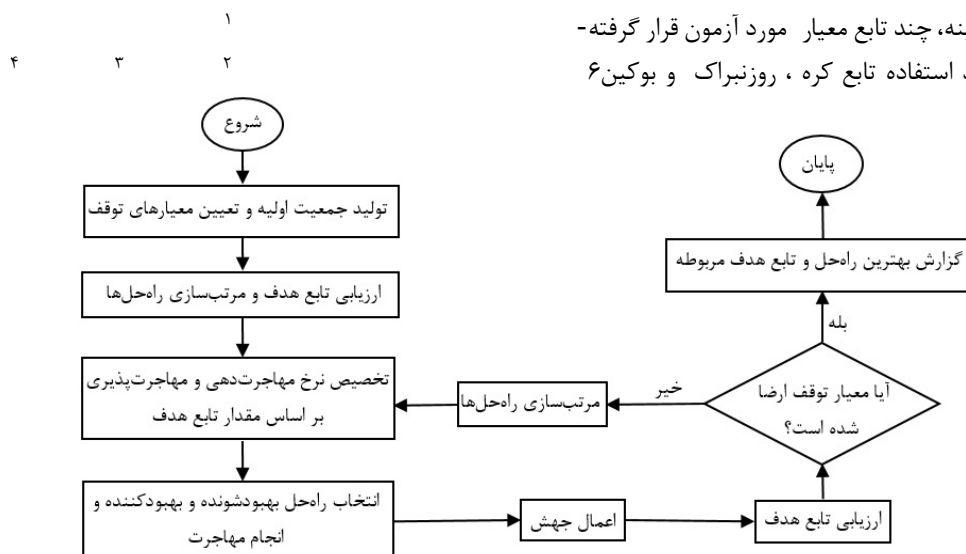
با احتمال مشخصی مانند  $P_{mod}$ ، هر راه‌حل می‌تواند بر اساس راه‌حل دیگری بهبود یابد. اگر راه‌حل  $S_i$  برای بهبود انتخاب شود، نرخ مهاجرت‌پذیری  $\lambda_i$  در تصمیم‌گیری احتمالی برای اصلاح SIVها استفاده می‌شود؛ بعد از انتخاب SIVها برای اصلاح، نرخ مهاجرت‌دهی  $\mu_i$  مربوط به سایر راه‌حل‌ها برای انتخاب راه‌حل بهبود دهنده‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌طور تصادفی SIVهای از راه‌حل منتخب با SIVهای راه‌حل  $S_i$  جایگزین می‌گردند.

باید در نظر داشت که تمامی راه‌حل‌ها (در صورت عدم نخبه‌گرایی) در هر مرحله، اصلاح می‌گردد، ولی میزان

## صحت‌سنجی الگوریتم BBO

در این قسمت، به منظور ارزیابی توانایی BBO در یافتن نقاط بهینه، چند تابع معیار مورد آزمون قرار گرفته‌اند. توابع مورد استفاده تابع کره، روزنبراک و بوکین ۶

می‌باشند. روابط ۴، ۵ و ۶ به ترتیب معادلات این توابع را نشان می‌دهند. مقدار بهینه‌ی مطلق تابع کره در نقطه‌ی



شکل ۳- روندنمای الگوریتم BBO.

تابع هدف برای هر سه تابع در هر دو روش حدود ۹۰۰۰، و تعداد جمعیت برابر ۱۰ در نظر گرفته شد. بهترین فراسنج‌های هر روش به وسیله‌ی آزمون و خطا تعیین گردیدند. پس از آن برای هر یک از توابع ۱۰ بار انجام شد. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نحوه‌ی همگرایی دو الگوریتم را در متوسط عملکردشان را، نشان می‌دهند. به منظور واضح‌تر شدن تفاوت عملکرد دو روش، محور عمودی لگاریتم تابع هدف است.

جدول ۱ مقدار تابع هدف ۱۰ اجرای BBO و GA را برای سه تابع ذکر شده نشان می‌دهد. عملکرد BBO نسبت به GA در تمامی اجراها بهتر بوده است. در تمامی توابع حتی بدترین عملکرد BBO از بهترین عملکرد GA مناسب‌تر بوده است. همچنین، انحراف معیار جواب‌های حاصل از BBO کمتر از GA است، که نقطه قوتی برای الگوریتم BBO به‌شمار می‌رود. همان‌طور که مشخص است، در اکثر مواقع BBO با دقت بسیار بالایی به جواب بهینه‌ی مطلق نزدیک شده است.

(۰،۰،.....،۰) است و برابر صفر می‌باشد. در اینجا تابع کره ۲۰ بعدی در نظر گرفته شد. تابع روزنبراک و بوکین ۶ در این مطالعه دو بعدی در نظر گرفته شده‌اند. مقدار بهینه‌ی تابع روزنبراک برابر با صفر و در نقطه‌ی (۱،۱) قرار دارد و مقدار بهینه تابع بوکین ۶ نیز برابر صفر است که در نقطه‌ی (۱۰،۱) واقع شده است. شکل ۴ این سه تابع را در فضای سه بعدی نشان می‌دهد:

Sphere :

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4)$$

Rosenbrock :

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2] \quad (5)$$

Bukin 6 :

$$f(x_1, x_2) = 100\sqrt{|x_2 - 0.01x_1^2|} + 0.01|x_1 + 10| \quad (6)$$

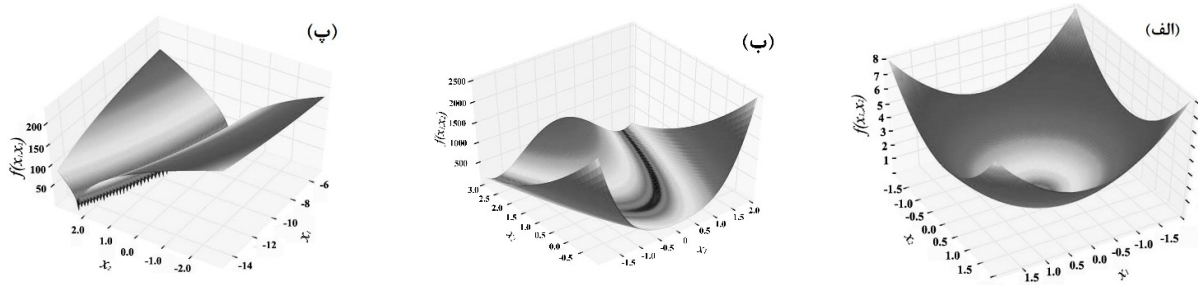
نتایج مربوط به اجرای BBO برای توابع معیار در مقایسه با نتایج حاصل از GA حاکی از برتری BBO در نزدیک شدن به جواب بهینه مطلق است. شمار ارزیابی‌های

<sup>۱</sup>rosenbrock

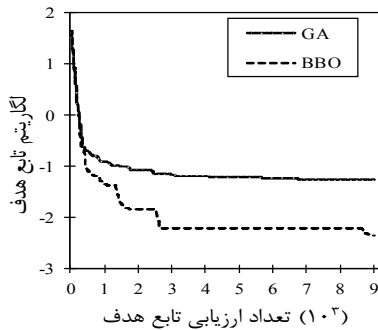
<sup>۲</sup>bukin6

<sup>۳</sup>benchmark function

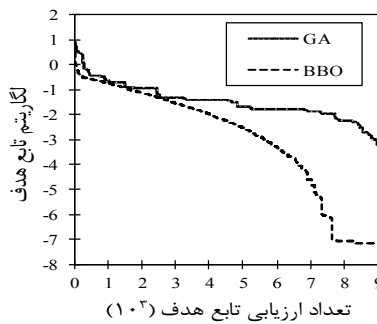
<sup>۴</sup>sphere



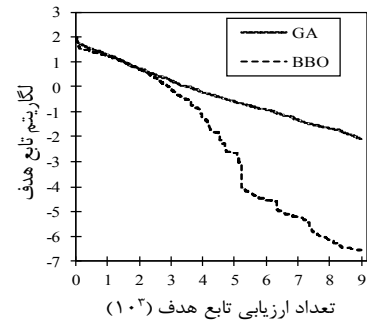
شکل ۴- (الف) تابع کره (ب) تابع روزنبراک و (پ) تابع بوکین ۶.



شکل ۷- نتایج اجرای GA و BBO برای تابع بوکین ۶.



شکل ۶- نتایج اجرای GA و BBO برای تابع روزنبروک.



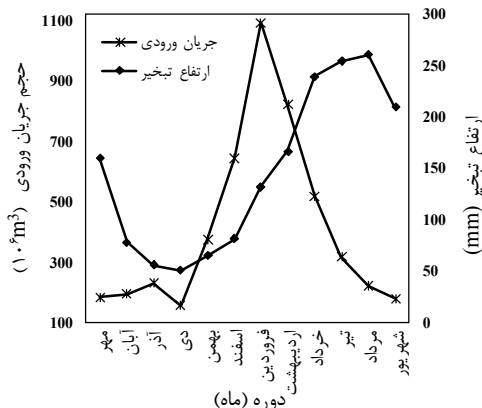
شکل ۵- نتایج اجرای GA و BBO برای تابع کره.

جدول ۱- نتایج اجرای BBO و GA در ۱۰ اجرای مختلف برای توابع معیار.

بوکین ۶		روزنبراک		کره		نام تابع
GA	BBO	GA	BBO	GA	BBO	شماره اجرا
$8/6 \times 10^{-2}$	$3/3 \times 10^{-5}$	$2/7 \times 10^{-3}$	$7/3 \times 10^{-8}$	$4/6 \times 10^{-2}$	$3/0 \times 10^{-7}$	1
$4/8 \times 10^{-2}$	$4/5 \times 10^{-5}$	$4/8 \times 10^{-4}$	$3/6 \times 10^{-9}$	$5/1 \times 10^{-2}$	$4/2 \times 10^{-8}$	2
$5/4 \times 10^{-2}$	$9/9 \times 10^{-3}$	$2/4 \times 10^{-4}$	$2/1 \times 10^{-7}$	$1/2 \times 10^{-1}$	$1/0 \times 10^{-7}$	3
$2/3 \times 10^{-2}$	$7/6 \times 10^{-4}$	$1/1 \times 10^{-3}$	$1/4 \times 10^{-8}$	$5/9 \times 10^{-2}$	$1/1 \times 10^{-6}$	4
$4/5 \times 10^{-2}$	$6/4 \times 10^{-3}$	$3/7 \times 10^{-5}$	$1/9 \times 10^{-8}$	$7/5 \times 10^{-2}$	$1/6 \times 10^{-7}$	5
$5/7 \times 10^{-2}$	$7/2 \times 10^{-3}$	$1/1 \times 10^{-5}$	$3/8 \times 10^{-8}$	$1/3 \times 10^{-1}$	$7/7 \times 10^{-8}$	6
$6/7 \times 10^{-2}$	$8/7 \times 10^{-3}$	$1/4 \times 10^{-5}$	$9/6 \times 10^{-8}$	$7/8 \times 10^{-2}$	$8/8 \times 10^{-8}$	7
$6/3 \times 10^{-2}$	$4/8 \times 10^{-3}$	$4/9 \times 10^{-4}$	$1/7 \times 10^{-7}$	$7/8 \times 10^{-2}$	$4/7 \times 10^{-7}$	8
$4/8 \times 10^{-2}$	$7/2 \times 10^{-3}$	$1/4 \times 10^{-4}$	$5/0 \times 10^{-8}$	$8/8 \times 10^{-2}$	$1/4 \times 10^{-7}$	9
$5/2 \times 10^{-2}$	$3/3 \times 10^{-4}$	$5/5 \times 10^{-5}$	$3/3 \times 10^{-8}$	$8/1 \times 10^{-2}$	$3/5 \times 10^{-7}$	10
$2/3 \times 10^{-2}$	$3/3 \times 10^{-5}$	$1/1 \times 10^{-5}$	$3/6 \times 10^{-9}$	$4/6 \times 10^{-2}$	$4/2 \times 10^{-8}$	بهترین
$8/6 \times 10^{-2}$	$9/9 \times 10^{-3}$	$2/7 \times 10^{-3}$	$2/1 \times 10^{-7}$	$1/3 \times 10^{-1}$	$1/1 \times 10^{-6}$	بدترین
$5/4 \times 10^{-2}$	$4/6 \times 10^{-3}$	$5/2 \times 10^{-4}$	$7/0 \times 10^{-8}$	$8/1 \times 10^{-2}$	$2/9 \times 10^{-7}$	متوسط
$1/6 \times 10^{-2}$	$3/9 \times 10^{-3}$	$8/3 \times 10^{-4}$	$6/8 \times 10^{-8}$	$2/7 \times 10^{-2}$	$3/3 \times 10^{-7}$	انحراف معیار

### مطالعه‌ی موردی

در این بررسی مخزن کارون ۴ به عنوان مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شد. این مخزن روی رودخانه کارون با هدف برقایی ساخته شده است. رود کارون به‌عنوان مهم‌ترین و پرآب‌ترین منبع آب سطحی کشور محسوب می‌شود. طول رودخانه کارون ۹۵۰ کیلومتر می‌باشد. از نظر جغرافیایی مخزن کارون ۴ در استان چهارمحال و بختیاری و در مختصات ۳۵'۳۱" عرض شمالی و ۲۴'۵۰" طول شرقی واقع شده است. حجم‌های کمینه و بیشینه این مخزن به ترتیب ۱۱۴۱ و ۲۱۹۰ میلیون متر مکعب، همچنین ظرفیت نصب نیروگاه برقایی آن (PPC) برابر با ۱۰۰۰ مگاوات می‌باشد. بهره‌برداری از این مخزن در یک دوره‌ی پنج ساله با گام زمانی ماهانه برای سال‌های ۷۶-۷۵ تا ۸۰-۷۹ انجام شد. شکل ۸ متوسط ماهانه‌ی جریان ورودی، و تبخیر مربوط به مخزن کارون ۴ را در این دوره پنج ساله نشان می‌دهد.



شکل ۸- متوسط ماهانه‌ی جریان ورودی و ارتفاع تبخیر مربوط به مخزن کارون ۴ در طول دوره بهره‌برداری.

### بهره‌برداری از سامانه‌ی مخازن

اساس بهره‌برداری از مخازن بر پایه رابطه‌ی پیوستگی استوار است. این رابطه یک رابطه‌ی ساده به شمار می‌رود که در هر دوره، با برقراری یک ترازنامه ساده، حجم مخزن را در انتهای دوره نتیجه می‌دهد. رابطه‌ی (۷) معادله پیوستگی را بیان می‌کند:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - Sp_t - Loss_t \quad (7)$$

که در آن،  $t$  = شماره‌ی دوره مورد نظر (ماه)،  $S_t$  و  $S_{t+1}$  = به ترتیب حجم ذخیره‌ی مخزن در ابتدا و انتهای دوره  $t$  (میلیون متر مکعب)،  $Q_t$  = حجم جریان ورودی رود

به مخزن در طول دوره‌ی  $t$  (میلیون متر مکعب)،  $R_t$  = حجم رهاسازی از مخزن در طول دوره‌ی  $t$  (میلیون متر مکعب)،  $Sp_t$  = حجم سرریز از مخزن در طول دوره‌ی  $t$  (میلیون متر مکعب) و  $Loss_t$  = مقدار تلفات تبخیر در طول دوره‌ی  $t$  (میلیون متر مکعب) می‌باشند.

به منظور محاسبه‌ی تلفات، از رابطه‌ی (۸) استفاده شد. سطح آب در مخزن در هر دوره زمانی تابعی از حجم ذخیره در همان دوره در نظر گرفته شد که از منحنی حجم-سطح مخزن به‌دست آمد:

$$Loss_t = \frac{Ev_t \times \bar{A}_t}{1000} \quad (8)$$

$$\bar{A}_t = (A_t + A_{t+1}) / 2 \quad (9)$$

در آنها،  $Ev_t$  = تبخیر از سطح مخزن در طول دوره  $t$  (میلی‌متر)،  $\bar{A}_t$  = سطح متوسط مخزن در طول دوره‌ی  $t$  (کیلومتر مربع)،  $A_t$  و  $A_{t+1}$  = به ترتیب سطح مخزن در ابتدا و انتهای دوره  $t$  (کیلومتر مربع)، می‌باشند. محاسبه‌ی میزان سرریز از مخزن نیز با کاربرد رابطه‌ی (۱۰) انجام پذیرفت.

$$\begin{cases} \text{if } S_t + Q_t - R_t - Loss_t > S_{\max} \\ SP_t = S_t + Q_t - R_t - Loss_t - S_{\max} \\ \text{if } S_t + Q_t - R_t - Loss_t \leq S_{\max} \\ SP_t = 0 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن  $S_{\max}$  = حجم بیشینه مخزن (میلیون متر مکعب) است. دو قید دیگر، که مربوط به حجم مخزن می‌باشند، نیز به صورت زیر وارد محاسبات می‌شوند:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (11)$$

$$S_t = S_{t+1} \quad (12)$$

که در آنها  $S_{\min}$  = حجم کمینه‌ی مخزن (میلیون متر مکعب)،  $S_t$  = حجم مخزن در ابتدای دوره‌ی بهره‌برداری (میلیون متر مکعب)،  $S_{t+1}$  = حجم مخزن در انتهای دوره -  $t$  بهره‌برداری (میلیون متر مکعب) و  $T$  = طول دوره‌ی بهره‌برداری می‌باشند. در ادامه، روابط مورد نیاز برای بهره‌برداری با هدف برقایی از مخزن ارائه شدند. در مخازن برقایی توان تولیدی نیروگاه از رابطه‌ی زیر محاسبه محاسبه می‌شود:



مخزن با کاربرد روش BBO، و همچنین با استفاده از GA و NLP انجام شد. BBO و GA در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> نسخه‌ی ۷ پیاده‌سازی شدند و روش NLP با استفاده از نرم‌افزار لینگو<sup>۲</sup> نسخه‌ی ۱۱ انجام پذیرفتند.

### نتایج

به منظور تعیین فراسنج‌های مناسب برای دو الگوریتم تکاملی مورد بحث، از روش آزمون خطا و تحلیل حساسیت برای فراسنج‌های موثرتر استفاده گردید. در روش BBO، نرخ جهش ۵ درصد، و  $\alpha$  برابر با ۱ همگرایی لازم را ایجاد می‌کرد. همچنین، برای انتخاب راه‌حل بهبود-کننده از چرخ رولت استفاده گردید. در مورد GA، برای جهش از تابع یکنواخت، و در فرایند انتخاب از چرخ رولت بهره‌وری شد. همچنین، تابع ترکیب دو نقطه‌ای با نرخ ترکیب ۰/۶ بهترین عملکرد GA را نتیجه می‌داد. نخبه-گرایی در هر دو روش برابر با یک در نظر گرفته شد. تعداد جمعیت در GA و BBO برابر با ۷۰، و تعداد تکرار برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. پس از تعیین فراسنج‌های بهینه هر دو الگوریتم ۱۰ اجرا برای هر یک در نظر گرفته شدند. مقدار تابع هدف این مسئله بر اساس روش NLP بعد از حدود ۱۶ ساعت اجرای لینگو برابر با ۱/۲۱۳ به دست آمد. این جواب به عنوان بهینه‌ی مطلق برای مسئله‌ی مزبور در نظر گرفته شد. در بهترین حالت، BBO بعد از ۷۰۰۰ ارزیابی به جواب ۱/۲۲۳ همگرا گردید. مدت زمان هر اجرای BBO کمتر از دو دقیقه به طول انجامید. GA نیز در بهترین عملکرد خود در ۱۰ اجرا به مقدار ۱/۵۳۵ رسید. همان‌طور که مشخص است، مقدار تابع هدف حاصل از BBO بسیار نزدیک به جواب بهینه‌ی مطلق است. این نتیجه نشان‌دهنده‌ی قدرت BBO در نزدیک شدن به جواب بهینه‌ی کلی مسئله است. جدول ۲ خلاصه‌ای را از نتایج حاصل از اجراهای مختلف BBO و GA نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲، میزان تغییرات مقدار تابع هدف در روش BBO در ۱۰ اجرای مختلف بسیار ناچیز، و نزدیک به صفر است.

شکل ۹ نحوه‌ی همگرایی در متوسط عملکرد GA و BBO را در ۷۰۰۰ ارزیابی تابع هدف با کاربرد این دو الگوریتم نشان می‌دهد. علاوه بر مقدار تابع هدف، نحوه‌ی

$$P_{(t)} = g.e. \frac{Rp_{(t)}}{PF.Mul_{(t)}} \cdot \frac{(\bar{H}_{(t)} - Tw_{(t)})}{1000} \quad (13)$$

که در آن،  $P_{(t)}$  = توان تولیدی در طول دوره‌ی t (مگاوات)، g = شتاب گرانش (متر بر مجذور ثانیه)،  $e =$  بازدهی نیروگاه،  $Rp_{(t)}$  = جریان خروجی از نیروگاه در دوره‌ی t (میلیون متر مکعب)،  $PF =$  ضریب کارکرد نیروگاه،  $Mul_{(t)} = 106$  برابر تعداد ثانیه‌های دوره‌ی t،  $\bar{H}_{(t)}$  = میانگین ارتفاع آب در مخزن در طول دوره‌ی t (متر) و  $Tw_{(t)}$  = ارتفاع پایاب مخزن در طول دوره‌ی t (متر)، می‌باشد. همچنین روابط و قیدهای زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

$$Rps_{(t)} = R_{(t)} - Rp_{(t)} \quad (14)$$

$$\bar{H}_{(t)} = \frac{H_{(t)} + H_{(t+1)}}{2} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{(t)} \leq PPC \quad (16)$$

که در آنها،  $Rps_{(t)}$  = سرریز از نیروگاه بعد از تولید برقایی در دوره‌ی t (میلیون متر مکعب)،  $H_{(t)}$  و  $H_{(t+1)}$  به ترتیب ارتفاع آب مخزن در ابتدا و انتهای دوره‌ی t (متر) و  $PPC =$  ظرفیت نصب نیروگاه (مگاوات) است. روابط سطح-حجم و حجم-ارتفاع استفاده شده به صورت زیر تعریف شدند:

$$A_{(t)} = a_1 S_{(t)} + a_2 S_{(t)} + a_3 S_{(t)} + a_4 \quad (17)$$

$$H_{(t)} = b_1 S_{(t)} + b_2 S_{(t)} + b_3 S_{(t)} + b_4 \quad (18)$$

در آنها،  $a_1, a_2, a_3, a_4 =$  ضرایب ثابت رابطه‌ی سطح-حجم، و  $b_1, b_2, b_3, b_4 =$  ضرایب ثابت رابطه‌ی حجم-ارتفاع می‌باشند. همچنین، تابع هدف در نظر گرفته شده به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$Min Z = \sum_{t=1}^T \left(1 - \frac{P_{(t)}}{PPC}\right)^2 \quad (19)$$

که در آن،  $Z =$  تابع هدف مورد نظر است، که قصد کمینه کردن آن را داریم.

پس از شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن کارون ۴ به وسیله‌ی روابط ذکر شده در قبل، بهره‌برداری بهینه از این

<sup>1</sup>lingo

<sup>2</sup>MATLAB

همگرایی BBO نیز مناسب‌تر از GA بوده است و دچار همگرایی زودرس نشده است. هر دو الگوریتم در ارزیابی شماره‌ی ۱۰'۰۰۰ تقریباً توابع هدف یکسانی را دارند؛ اما

جدول ۲- خلاصه نتایج ۱۰ اجرای مختلف BBO و GA برای مخزن کارون ۴.

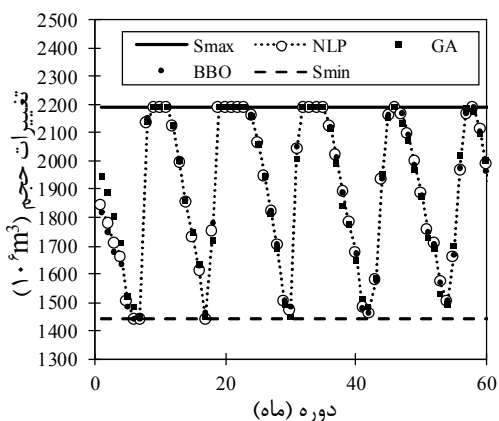
شماره اجرا	BBO	GA	بهینه مطلق
1	1/232	1/673	1/213
2	1/239	1/549	
3	1/227	1/865	
4	1/235	1/752	
5	1/223	1/987	
6	1/223	1/753	
7	1/227	1/931	
8	1/223	1/570	
9	1/229	1/842	
10	1/225	1/535	
بهترین	1/223	1/535	
بدترین	1/239	1/987	
متوسط	1/228	1/746	
انحراف معیار	0/005	0/162	

مختلف انتظار می‌رود، این دقت در مورد توان تولیدی و حجم مخزن در طول دوره نیز به چشم می‌خورد، به‌نحوی که ضریب همبستگی بین توان تولیدی حاصل از BBO و NLP برابر ۰/۹۹۳، بین GA و NLP برابر با ۰/۸۳۴ و ضریب همبستگی بین حجم مخزن در طول دوره، حاصل از BBO و NLP برابر ۰/۹۹۹، بین GA و NLP برابر با ۰/۹۹۲، است. بنابراین بر اساس ضریب همبستگی مربوط به جریان خروجی، توان تولیدی و حجم مخزن، BBO جواب حاصل از GA را به ترتیب ۱۹، ۱۹ و ۰/۶ درصد بهبود بخشیده است.

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، میزان خروجی مخزن، و همچنین توان تولیدی حاصل از GA در برخی ماه‌ها، به‌خصوص نیمه‌ی ابتدایی دوره‌ی بهره‌برداری، بیشتر از سایر روش‌ها است، اما در برخی ماه‌ها نیز کمبودهای بسیار شدیدتر از دو روش دیگر ایجاد کرده است. این بدان معنی است که GA نتوانسته است کمبودها را به صورت بهینه به حداقل رسانده و آنها را در طول دوره‌ی بهره‌برداری به

از GA در متوسط عملکرد، به مقدار ۱/۲۲۸ همگرا شده است. شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب میزان خروجی از مخزن، میزان توان تولیدی و تغییرات حجم مخزن در طول دوره‌ی بهره‌برداری از مخزن کارون ۴ را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود، متغیرهای خروجی حاصل از BBO بسیار نزدیک، و مشابه خروجی‌های نرم‌افزار لینگو می‌باشد. در خصوص GA، در برخی از ماه‌ها، تفاوت‌های زیادی بین متغیرهای حاصل از این روش و متغیرهای بهینه حاصل از لینگو وجود دارند. برای مثال، در شکل ۱۱، از دوره ۳۴ به بعد همخوانی کمی بین نتایج GA و نتایج لینگو وجود دارد.

ضریب همبستگی بین خروجی‌های حاصل از BBO و NLP برابر با ۰/۹۸۳، بین GA و NLP برابر با ۰/۸۲۶ و بین BBO و GA برابر با ۰/۸۱۷ است؛ بنابراین خروجی-های حاصل از BBO با همبستگی بالا (بیش از ۰/۱۵ نسبت به GA) بسیار نزدیک به جواب حاصل از روش NLP است. همان‌طور که بر اساس جریان‌های خروجی از روش‌های



شکل ۱۲- تغییرات حجم مخزن کارون ۴ در طول دوره‌ی بهره‌برداری.

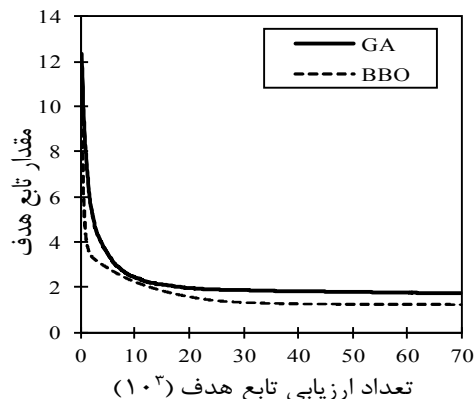
### نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق ارزیابی قدرت الگوریتم BBO در بهره‌برداری بهینه از مخزن بود. ابتدا در سه مسئله آزمون به صحت‌سنجی الگوریتم پرداخته شد. مسائل آزمون شامل سه تابع ریاضی کره، روزنبراک و بوکین ۶ بود. در مورد این مسائل، BBO با دقت بسیار مناسبی به جواب بهینه مطلق نزدیک شد. در این مسائل دقت BBO به طور مشهود بهتر از GA بوده است. علاوه بر این انحراف معیار جواب‌های حاصل از اجراهای مختلف در GA بزرگ‌تر از BBO است، که این امر می‌تواند به عنوان نقطه‌ی ضعیفی برای GA مطرح شود. در مورد توابع کره، روزنبراک و بوکین ۶، مقدار تابع هدف در GA در بهترین حالت به ترتیب برابر  $4/6 \times 10^{-2}$ ،  $1/1 \times 10^{-5}$  و  $2/3 \times 10^{-2}$  و در روش BBO به ترتیب برابر  $4/2 \times 10^{-8}$ ،  $3/6 \times 10^{-9}$  و  $3/3 \times 10^{-5}$  بوده است.

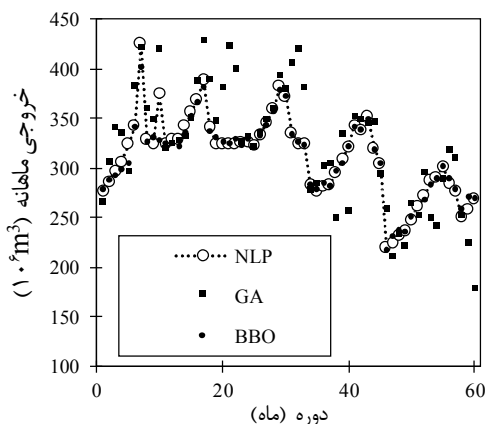
در ادامه، بهره‌برداری از مخزن کارون ۴ با هدف برقایی برای یک دوره‌ی ۶۰ ماهه انجام پذیرفت. در این مورد علاوه بر BBO و GA، از روش NLP نیز استفاده گردید. نتایج نشان دادند که BBO از توانایی بالاتری نسبت به GA برخوردار است، به نحوی که متوسط تابع هدف برای BBO در ۱۰ اجرا برابر با  $۱/۲۲۸$ ، و برای GA برابر با  $۱/۷۴۶$  بوده است. همچنین، در مقایسه‌ی بهترین عملکرد، هر دو الگوریتم، توانایی BBO در همگرایی به جواب بهینه‌ی مطلق بیشتر از GA بوده است. در این حالت، مقدار تابع هدف BBO و GA در بهترین حالت به ترتیب برابر  $۱/۲۲۳$  و  $۱/۵۳۵$  و مقدار تابع هدف حاصل از روش NLP برابر با  $۱/۲۱۳$

به‌دست آمده است؛ بنابراین، علاوه بر اینکه می‌تواند

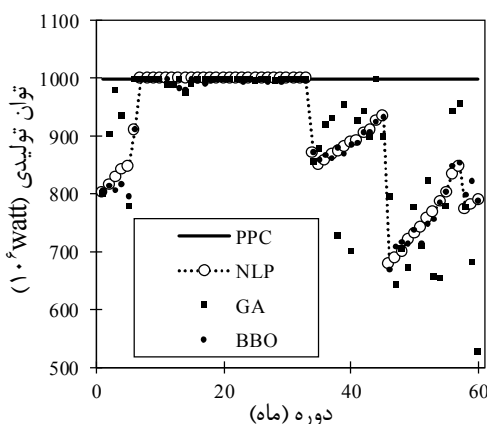
خوبی توزیع نماید. BBO در این زمینه رفتاری بسیار مشابه روش NLP داشته، و سیاست‌های بهینه‌ی بهره‌برداری را از مخزن به خوبی استخراج نموده است.



شکل ۹- همگرایی BBO و GA در متوسط عملکرد برای مخزن کارون ۴.



شکل ۱۰- میزان خروجی از مخزن کارون ۴ در طول دوره‌ی بهره‌برداری.



شکل ۱۱- میزان توان تولیدی از مخزن کارون ۴ در طول دوره بهره‌برداری

heat exchangers using biogeography-based (BBO) algorithm. *Appl. Therm. Eng.* 51: 1263–1272.

9) Jamuna, K., and K.S. Swarup. 2011. Biogeography based optimization for optimal meter placement for security constrained state estimation. *Swarm Evoluti. Comput.* 1: 89-96.

10) Jothiprakash, V., and G. Shanthi. 2006. Single reservoir operating policies using genetic algorithm. *Water Resour. Manage.* 20: 917-929.

11) Karamouz, M., and M.H. Houck. 1987. Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation. *J. Am. Water Resour. Associ.* 23: 1-9.

12) Kumar, D.N., and M.J. Reddy. 2006. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. *Water Resour. Manage.* 20: 879-898.

13) Mousavi, S.J., K. Ponnambalam, and F. Karray. 2005. Reservoir Operation Using a Dynamic Programming Fuzzy Rule-Based Approach. *Water Resour. Manage.* 19: 655-672.

14) Revelle, C., E. Joeres, and W. Kirby. 1969. The linear decision rule in reservoir management and design: 1, Development of the stochastic model. *Water Resour. Res.* 5: 767-777.

15) Simon, D. 2008. Biogeography-based optimization. *Evoluti. Comput. IEEE Trans.* 12: 702-713.

16) Simon, D., R. Rarick, M. Ergezer, and D. Du. 2011. Analytical and numerical comparisons of biogeography-based optimization and genetic algorithms. *Inform. Sci.* 181: 1224-1248.

17) Zahraie, B., and S.M. Hosseini. 2009. Development of reservoir operation policies considering variable agricultural water demands. *Expert Syst. Appli.* 36: 4980-4987.

به عنوان یک روش تکاملی مناسب و قدرتمند مطرح باشد، توانایی بالایی را در نزدیک شدن به جواب بهینه مطلق دارد.

نتایج به دست آمده حاکی از قدرت و توانایی BBO در حل مسائل پیچیده است. با در نظر گرفتن این ویژگی، در کنار سادگی مبانی علمی و عملی BBO، و فراسنج‌های نسبتاً کم این الگوریتم، به نظر می‌رسد BBO الگوریتم بسیار مناسبی برای کاربرد در انواع مسائل بهینه‌سازی باشد.

## مراجع

۱) جنت‌رستمی، س.، م. خلقی و الف. بزرگ‌حداد. ۱۳۸۹. مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده جستجوی هارمونی. *مجله دانش آب و خاک*. ۲۰: ۶۱-۷۲.

۲) عمادی، ع.، م. خادمی، س.الف. محسنی‌موحد و م. نوری امامزاده‌ئی. ۱۳۹۱. مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی بازیخت (SA)، شبیه‌آبدی و سیاست بهره‌برداری استاندارد در بهره‌برداری از مخزن (مطالعه موردی: سد مخزنی درودزن). *مجله پژوهش آب ایران*. ۶: ۱۸۷-۱۹۶.

۳) فلاح مهدی‌پور، ا. و الف. بزرگ‌حداد. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای چندمنظوره با کاربرد روش بهینه‌سازی مجموعه ذرات. *مجله آب و فاضلاب*. ۲۳: ۱۰۵-۹۷.

4) Afshar, A., O. Bozorg Haddad, M.A. Mariño, and B.J. Adams. 2007. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation. *J. Franklin Inst.* 344: 452-462.

5) Chang, L.C., and F.J. Chang. 2009. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. *J. Hydrol.* 377: 12-20.

6) Fallah-Mehdipour, E., O.B. Haddad, and M.A. Mariño. 2012. Real-Time operation of reservoir system by genetic programming. *Water Resour. Manage.* 26: 4091-4103.

7) Haddad, O.B., A. Afshar, and M.A. Mariño. 2008. Design-operation of multi-hydropower reservoirs: HBMO approach. *Water Resour. Manage.* 22: 1709-1722.

8) Hadidi, A., and A. Nazari. 2013. Design and economic optimization of shell-and-tube