



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره اول، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

## بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزنه سد دز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار

طناز سادات فرحناکیان<sup>۱</sup>، رامتین معینی<sup>۲</sup> و سیدفرهاد موسوی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه هیدرولیکی، دانشگاه سمنان،

<sup>۲</sup>استادیار گروه عمران، دانشگاه اصفهان، <sup>۳</sup>استاد گروه سازه هیدرولیکی، دانشگاه سمنان

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۵

### چکیده

**سابقه و هدف:** امروزه، کمبود منابع آب از چالش‌های اساسی کشور ما ایران می‌باشد. بنابراین، ذخیره‌سازی و بهره‌برداری بهینه از منابع محدود موجود، از جمله آب ذخیره شده در مخازن سدها، از موضوعات مورد توجه پژوهشگران حوزه منابع آب می‌باشد. در این پژوهش، مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزنه سد دز با استفاده از یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی، به نام الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، حل شده است. در حالت کلی، اساس این الگوریتم، قوانین الکترواستاتیک و برآیند نیروهای ناشی از میدان الکتریکی ذرات باردار می‌باشد. برای اولین بار، کاوه و طلعت‌اثری (۲۰۱۰a) این الگوریتم را معرفی کرده و قابلیت‌های آن را در زمینه حل مسائل مهندسی و توابع نمونه، بررسی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم مذکور کارایی خوبی دارد. بنابراین، استفاده از آن در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی توصیه می‌شود. ولی، بررسی سوابق تحقیقاتی نشان‌دهنده آن است که استفاده از این الگوریتم در حل مسائل حوزه مهندسی منابع آب بسیار محدود است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش، دو مسأله بهره‌برداری بهینه ساده و برقیابی سد دز، برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده است. برای حل این مسائل، دو فرمول‌بندی ارائه شده، که در فرمول‌بندی اول، مقدار آب رها شده از مخزن سد و در فرمول‌بندی دوم، حجم ذخیره مخزن سد به‌عنوان متغیر تصمیم انتخاب و نتایج حاصل از آن‌ها با سایر نتایج موجود مقایسه شده است.

**یافته‌ها:** مقایسه نتایج، نشان‌دهنده کارایی خوب الگوریتم مذکور در حل این مسائل است که در آن جواب‌های فرمول‌بندی اول از دوم بهتر است. به عبارت دیگر، نتایج حاصل از فرمول‌بندی اول برای دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله نسبت به نتایج فرمول‌بندی دوم به ترتیب ۱۱/۲۹ و ۱۶/۶۹ درصد برای مسأله بهره‌برداری ساده و ۲۰/۰۶ و ۳۷/۶۶ درصد برای مسأله بهره‌برداری برقیابی کاهش یافته است. همچنین، نتایج حاصل از این الگوریتم برای دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله نسبت به نتایج الگوریتم هوش جمعی ذرات به ترتیب ۳۳/۶۴ و ۷۴/۹۷ درصد برای مسأله بهره‌برداری ساده و ۶/۵۳ و ۴۱/۴۸ درصد برای مسأله بهره‌برداری برقیابی کاهش یافته است. علاوه بر آن، نتایج حاصل از این الگوریتم برای دوره‌های ۵ و

\* مسئول مکاتبه: [r.moeini@eng.ui.ac.ir](mailto:r.moeini@eng.ui.ac.ir)

۲۰ ساله نسبت به نتایج الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۷/۷۹ و ۳۵/۵۹ درصد برای مسأله بهره‌برداری ساده و ۱۱/۳۲ و ۶۷/۴۳ درصد برای مسأله بهره‌برداری برقایی بهبود یافته است.

**نتیجه‌گیری:** بررسی این نتایج با نتایج به دست آمده از سایر الگوریتم‌های موجود نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدهاست. با توجه به نتایج مذکور، پژوهش و استفاده از این الگوریتم در حل سایر مسائل حوزه مهندسی آب توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، بهره‌برداری بهینه، سیستم تک‌مخزنه، سد دز

### مقدمه

در حالت کلی، اساس کار الگوریتم‌های فراکاوشی، رفتار طبیعی موجودات زنده و پدیده‌های فیزیکی هستند که به صورت مصنوعی شبیه‌سازی شده‌اند. در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن با استفاده از این الگوریتم‌ها، پژوهش‌هایی انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. در این راستا، چونگ و الشافی (۲۰۱۴) پژوهش جامعی در زمینه مدل‌سازی مخازن سدها و بهره‌برداری از آنها با استفاده از روش‌های مختلف و به‌ویژه الگوریتم‌های فراکاوشی ارائه نمودند و به‌طورکلی نتایج استفاده از آنها را مثبت ارزیابی کردند (۸). ایسات و هال (۱۹۹۴) از الگوریتم ژنتیک (GA) و روش برنامه‌ریزی پویا برای بهره‌برداری از یک سیستم چهارمخزنه استفاده نمودند و نتایج به دست آمده را مقایسه کردند. بررسی نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به روش برنامه‌ریزی پویا بود که با استفاده از این الگوریتم مشکل نفرین ابعادی روش برنامه‌ریزی پویا در حل مسائل بزرگ‌مقیاس برطرف شد (۱۱). ردی و کومار (۲۰۰۶) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO)<sup>۱</sup>، مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن با اهداف تولید انرژی برقایی و کشاورزی را حل نمودند. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان نتایج نسبت به الگوریتم ژنتیک ۰/۶۳

امروزه، کمبود منابع آب از چالش‌های اساسی کشور ایران است. بنابراین، ذخیره‌سازی و بهره‌برداری بهینه از منابع محدود موجود بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران و دست‌اندرکاران حوزه منابع آب قرار گرفته است. آب ذخیره شده در مخازن سدها یکی از منابع اصلی آب می‌باشد که لازم است به شکل بهینه از آن استفاده شود. بنابراین، لازم است که مسأله بهره‌برداری از مخازن سدها در قالب یک مسأله بهینه‌سازی مدل‌سازی شده و با استفاده از روش مناسب حل گردد. روش‌های حل مدل‌های بهینه‌سازی به چهار دسته کلی برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup>، برنامه‌ریزی غیرخطی<sup>۲</sup>، برنامه‌ریزی پویا<sup>۳</sup> و الگوریتم‌های فراکاوشی<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک از آنها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارا می‌باشند. در این میان، الگوریتم‌های فراکاوشی مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارند و بنابراین امروزه بیش از پیش از آنها در حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. از جمله مهم‌ترین مزایای الگوریتم‌های فراکاوشی می‌توان به عدم لزوم پیوسته بودن و مشتق‌پذیر بودن توابع هدف و قیود مسأله و رفتار جست‌وجوی هوشمندانه جواب‌ها در فضای جست‌وجوی مسأله اشاره نمود (۲۶).

- 1- Linear Programming
- 2- Non-Linear Programming
- 3- Dynamic Programming
- 4- Meta-heuristic Algorithms

- 5- Genetic Algorithm
- 6- Ant Colony Optimization Algorithm

درصد بهبود یافت (۳۲). بزرگ‌حداد و همکاران (۲۰۰۶) مدل توسعه‌یافته الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل را برای بهره‌برداری از یک مخزن با هدف حداقل نمودن کمبود آب پیشنهاد نمودند. مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب این الگوریتم نسبت به سایر روش‌های موجود از جمله الگوریتم ژنتیک بود. به عبارت دیگر، مقدار تابع هدف ۱۹/۶۱ درصد نسبت به نتایج الگوریتم ژنتیک بهبود یافت (۶). افشار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل<sup>۱</sup> (HBMO) مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را حل نمودند. نتایج، نشان‌دهنده قابل قبول و نزدیک بودن نسبت به نتایج روش برنامه‌ریزی خطی بود. به عبارت دیگر، مقدار تابع هدف به دست آمده از این الگوریتم ۹۷ درصد جواب بهینه مطلق به دست آمده از روش برنامه‌ریزی خطی بود (۳). معینی و افشار (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها را بررسی کردند. بدین منظور، با در نظر گرفتن دو متغیر تصمیم حجم مخزن و آب رهاسازی شده از مخزن، سه فرمول‌بندی برای حل این مسأله ارائه کردند که در فرمول‌بندی سوم، نسخه جدیدی از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را معرفی نمودند. مقایسه نتایج، نشان‌دهنده جواب‌های قابل قبول این الگوریتم و به‌ویژه فرمول‌بندی سوم نسبت به سایر روش‌ها بود (۲۵). افشار و معینی (۲۰۰۸) الگوریتم مورچگان مقید<sup>۲</sup> (CACOA) را معرفی و از آن برای حل بهینه مسائل بهره‌برداری از مخازن استفاده نمودند و جواب‌های مطلوبی را نسبت به سایر روش‌های موجود به دست آوردند. با معرفی الگوریتم مقید، نتایج حل مسائل (به‌ویژه مسائل بزرگ‌مقیاس) به شکل قابل‌توجهی بهبود یافت (۲). رانی و مریرا (۲۰۱۰) عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی و

بهینه‌سازی در سیستم مخازن را بررسی نموده و نشان دادند که الگوریتم‌های تکاملی (از جمله الگوریتم ژنتیک) دارای قابلیت‌های زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی هستند. به عبارت دیگر، با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، مشکلات موجود در روش‌های سنتی و ریاضی برطرف می‌شود (۳۱). چنگ و همکاران (۲۰۱۰) از الگوریتم ژنتیک مقید برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب این روش به منظور کاهش کمبود آب مورد نیاز بود (۷). نوروزی و همکاران (۲۰۱۳) توانایی الگوریتم ژنتیک را به منظور بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چندمخزنه شامل سدهای وشمگیر، گلستان و بوستان واقع در حوضه گرگان‌رود، ارزیابی نمودند (۳۰). وانگ و همکاران (۲۰۱۱) از الگوریتم ژنتیک چندرده‌ای تعاملی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری بلندمدت از سیستم مخازن استفاده نمودند. نتایج، نشان‌دهنده آن بود که با استفاده از این روش، جواب‌های مطلوب‌تری حاصل می‌شود. بهبود ۲۵ درصدی مقدار تابع هدف و کاهش ۸۱ درصدی مدت زمان محاسبات در یک دوره طولانی ۲۱ ساله از مزایای این روش بود (۳۷). ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) از الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات ترکیبی اصلاح‌شده برای مدیریت انرژی برقی تولیدی سیستم چندمخزنه در حوضه آبریز مینجیانگ<sup>۳</sup> در کشور چین استفاده نمودند (۴۰). افشار (۲۰۱۲) برای بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن از الگوریتم هوش جمعی ذرات استفاده کرد. همچنین در ادامه، الگوریتم مقید آن را معرفی نمود و با مقایسه جواب‌های حاصل‌شده نشان داد که الگوریتم جدید کارایی مناسبی دارد. به عبارت دیگر، با معرفی الگوریتم مقید، مقادیر جواب‌های مسائل (به‌ویژه مسائل بزرگ‌مقیاس) بهبود یافت (۱). سیاف‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) مسأله

- 1- Honey Bees Mating Optimization
- 2- Constrained Ant Colony Optimization Algorithm

درصد و در مقایسه با الگوریتم هوش جمعی ذرات ۴۹/۱۴ درصد بهبود یافت (۱۵). بشیری‌اطربی و همکاران (۲۰۱۵) قابلیت‌های الگوریتم جست‌وجوی هارمونی<sup>۳</sup> را در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن بررسی نمودند. این پژوهشگران از این الگوریتم برای به حداقل رساندن کسری آب و خسارت سیل در پایین‌دست یک مخزن استفاده نمودند. نتایج، نشان‌دهنده آن بود که از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی می‌توان به‌طور مؤثری برای بهره‌برداری از مخزن و مدیریت سیل استفاده نمود (۵). یاشار (۲۰۱۶) از الگوریتم جست‌وجوی فاخته<sup>۴</sup> برای بهینه‌سازی عملکرد مخزن یک سد در غرب ترکیه به‌منظور تولید انرژی برقایی استفاده نمود. نتایج، نشان‌دهنده بهبود عملکرد سیستم و افزایش تولید انرژی در حدود ۱۰٪ نسبت به مقادیر واقعی (به‌میزان ۱۶۰۰۰۰ مگاوات ساعت در ۱۸۳ ماه) بود (۳۸). معینی و بابایی (۲۰۱۷) الگوریتم اصلاحی هوش جمعی ذرات<sup>۵</sup> (IPSO) و نسخه مقید آن را معرفی نموده و از آن برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها استفاده کردند. جواب‌های حاصل شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای مسأله بهره‌برداری ساده از مخزن در دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله، به ترتیب ۴/۸۹ و ۷۵/۵۰ درصد و برای مسأله بهره‌برداری برقایی از مخزن، به ترتیب ۳/۶۶ و ۴۷/۹۴ درصد نسبت به الگوریتم اولیه بهتر شد (۲۷). معینی و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتم مقید جست‌وجوی گرانشی<sup>۶</sup> (CGSA) را معرفی و مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد را با استفاده از آن حل نمودند و نتایج مطلوب‌تری را نسبت به سایر روش‌های موجود به‌دست آوردند. به‌عبارت دیگر، با استفاده از الگوریتم مقید جست‌وجوی گرانشی، مقادیر تابع هدف

تخصیص بهینه از مخزن را با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی<sup>۱</sup> (ABC) حل و نتایج حاصل را با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودند. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن بود که با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی جواب‌های بهتر و با سرعت همگرایی بیش‌تر حاصل می‌شود (۳۵). معینی و افشار (۲۰۱۳) الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان مقید را برای حل مسأله بهینه‌سازی سیستم‌های چندمخزنه توسعه دادند و با به‌دست آوردن نتایج مناسب، توانایی‌های الگوریتم پیشنهادی در حل این گونه مسائل را نشان دادند. بررسی نتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم مقید پیشنهادی باعث بهبود همگرایی و کیفیت جواب‌های مسأله بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه می‌شود (۲۶). حسین و الشافی (۲۰۱۴a) مسأله بهینه‌سازی تعیین مقادیر خروجی از مخزن را با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی ذرات، ژنتیک و کلونی زنبورعسل مصنوعی حل نمودند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها به‌منظور تأمین تقاضا و نیز مدیریت دوره بحران کم‌آبی بود (۱۲). در ادامه، حسین و الشافی (۲۰۱۴b) سیاست بهره‌برداری کارآمد از مخزن را با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی تعیین نمودند. نتایج نشان داد که سیاست به‌دست آمده با استفاده از این الگوریتم قادر به تأمین ۹۸٪ نیازها در کل دوره زمانی می‌باشد (۱۳). حسینی‌موغاری و بنی‌حبيب (۲۰۱۴) از الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>۲</sup> برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، به‌منظور تأمین آب کشاورزی استفاده نمودند. نتایج، نشان‌دهنده عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و هوش جمعی ذرات بود. به‌عبارت دیگر، مقدار تابع هدف در مقایسه با الگوریتم ژنتیک ۳۰/۶۹

3- Harmony Search Algorithm

4- Cuckoo Search Algorithm

5- Improved Particle Swarm Optimization

6- Constrained Gravitational Search Algorithm

1- Artificial Bee Colony

2- Firefly Worm Algorithm

بر این زمینه، می‌تواند در زمینه‌های دیگر مانند سازه‌های صفحه‌ای، پوسته‌ای و قاب‌ها کاربرد داشته باشد (۲۱). کاوه و طلعت‌اهری (۲۰۱۰c) با استفاده از روش‌های آیین‌نامه‌ای LRFD-AISC و الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار مسأله بهینه‌سازی طراحی شبکه مشبک را حل نمودند و نشان دادند که عملکرد این الگوریتم، برای حل این مسائل، مناسب است. به عبارت دیگر، مقایسه نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، وزن سازه در مقایسه با نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و جست‌وجوی هارمونی به ترتیب ۰/۴۲ و ۱۱/۳۷ درصد کاهش می‌یابد (۲۲). کاوه و طلعت‌اهری (۲۰۱۱) الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار پیشرفته را معرفی کردند و کارایی آن را در مقایسه با سایر روش‌ها (از جمله الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی هارمونی) ارزیابی نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، وزن سازه‌های طراحی شده در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها کاهش می‌یابد (۲۳). کاوه و ذوالقدر (۲۰۱۱) مسأله بهینه‌سازی شکل و اندازه سازه‌های خرپایی با فرکانس محدود را به کمک الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار پیشرفته حل نمودند و نتایج را با نتایج به دست آمده از سایر الگوریتم‌ها، از جمله الگوریتم ژنتیک و هوش جمعی ذرات، مقایسه نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که با استفاده از این الگوریتم، سازه‌هایی با وزن کم‌تر در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها طراحی می‌شود (۲۴). کاوه و نیک آیین (۲۰۱۳) سیستم شبکه‌ای نامنظم بهینه با شرایط مرزی مختلف را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار و نیز نسخه پیشرفته آن طراحی کردند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم پایه سریع‌تر همگرا شده، ولی نسخه پیشرفته آن جواب‌های بهتری را ارائه

بهره‌برداری ساده از مخزن برای دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله، به ترتیب ۰/۱۴ و ۴۰/۳۳ درصد و برای مسأله بهره‌برداری برقایی از مخزن، به ترتیب ۰/۹۹ و ۵/۲۲ درصد بهبود یافت (۲۸). احترام و همکاران (۲۰۱۷a) از الگوریتم کوسه‌ماهی<sup>۱</sup> برای حل مسأله بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه استفاده نمودند و نتایج را با نتایج الگوریتم ژنتیک و هوش جمعی ذرات مقایسه کردند. بررسی نتایج نشان‌دهنده بهبود نتایج الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها بود (۹). احترام و همکاران (۲۰۱۷b) با ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و کریل<sup>۲</sup> یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسائل بهره‌برداری از سیستم تک‌مخزنه و چندمخزنه معرفی نمودند. بررسی نتایج نشان‌دهنده بهبود نتایج به دست آمده از الگوریتم ترکیبی نسبت به سایر نتایج موجود از جمله الگوریتم ژنتیک بود (۱۰).

الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار<sup>۳</sup> (CSS) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که برای اولین بار توسط کاوه و طلعت‌اهری (۲۰۱۰a)، بر مبنای قوانین الکترواستاتیک برآیند ناشی از میدان الکتریکی ذرات باردار، معرفی شد (۲۰). شایان ذکر است که از این الگوریتم برای حل برخی از مسائل بهینه‌سازی در حوزه مهندسی استفاده شده و با دستیابی به نتایج مطلوب، کارآمدی الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است. از جمله، کاوه و طلعت‌اهری (۲۰۱۰b) برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های خرپایی از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار استفاده کردند. بدین‌منظور، روش جدیدی به نام پرش به مرز<sup>۴</sup> را در راستای توسعه الگوریتم مذکور به منظور حل مسائل با متغیرهای گسسته، معرفی کردند و به این نتیجه رسیدند که این الگوریتم علاوه

- 1- Shark Algorithm
- 2- Krill Algorithm
- 3- Charged System Search
- 4- Fly to Boundary

تحت فشار مقایسه کردند و نشان دادند که این الگوریتم‌های پیشنهادی کارایی خوب و قابل قبولی در حل مسائل بهینه‌سازی مورد نظر دارند (۳۳). محمدی و مشایخی (۲۰۱۳) مسأله بهینه‌سازی ساختار<sup>۱</sup> سازه‌های فضاکار تحت دولایه را به کمک الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار حل نموده و نشان دادند که عملکرد این الگوریتم در بهینه‌سازی توپولوژی شبکه‌های دولایه مناسب است (۲۹). حسینی و همکاران (۲۰۱۳) به کمک الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، اندازه و شکل خرابی دوبعدی را بهینه طراحی کردند. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از این الگوریتم، سازه‌هایی با وزن کم‌تر در مقایسه با سایر روش‌ها طراحی می‌شود (۱۴). کرمی محمدی و کارگر (۲۰۱۳) پایش سلامت سازه‌ای و تشخیص آسیب پل فولادی بر اساس اطلاعات مودال را از طریق الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار بررسی نمودند. بررسی نتایج نشان داد که این الگوریتم سرعت همگرایی بالایی دارد و همچنین ابزاری توانمند و قابل اعتماد برای بررسی آسیب‌های سازه‌های بزرگ‌تر و سه‌بعدی، در مدت زمانی کوتاه، می‌باشد (۱۶).

بررسی سوابق پژوهش‌ها نشان‌دهنده آن است که الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، الگوریتمی مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی است که استفاده از آن در حل مسائل بهینه‌سازی حوزه منابع آب بسیار محدود است و بنابراین در این پژوهش، قابلیت‌های این الگوریتم در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بررسی می‌شود. به‌عنوان مطالعه موردی، مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن دز در دو دوره زمانی ۵ و ۲۰ ساله در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور

می‌کند (۱۸). کاوه و شکوهی (۲۰۱۴) هزینه تیرهای لانه‌زنبوری را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار پیشرفته بهینه نمودند و با مقایسه نتایج به‌دست آمده با سایر روش‌ها نشان دادند که این الگوریتم پیشرفته در مقایسه با نسخه اصلی، با تعداد تکرارهای کم‌تری به جواب بهینه می‌رسد (۱۹). کاوه و نصرالهی (۲۰۱۴) با ترکیب الگوریتم‌های هوش جمعی و جست‌وجوی ذرات باردار، سازه‌های مهندسی بهینه را طراحی کردند و نشان دادند که الگوریتم ترکیبی حاصل، عملکرد بهتری داشته و نیز سرعت همگرایی آن بیشتر می‌باشد (۱۷). شیخ‌الاسلامی و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار را در بهینه‌سازی شبکه توزیع آب به‌کار بردند و نشان دادند که در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی (از جمله الگوریتم هوش جمعی ذرات و بهینه‌سازی جامعه مورچگان)، این الگوریتم کارایی خوبی داشته و بنابراین برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی مناسب است (۳۶). صابری و کاوه (۲۰۱۵) مسأله تشخیص آسیب سازه‌های فضاکار به کمک روش نیروهای پسماند را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار بررسی نموده و مشاهده کردند که الگوریتم پیشنهادی در حل این مسأله کارآمد است (۳۴). زاهدی و همکاران (۲۰۱۱) یک شبکه آب‌رسانی بهینه را توسط الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار طراحی و نتایج به‌دست آمده را با سایر نتایج موجود مقایسه نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که این الگوریتم در حل مسأله موردنظر، کارایی خوبی داشته و نیز سریع‌تر به جواب بهینه همگرا شده است (۳۹). رحامی و جوانمردی (۲۰۱۳) عملکرد دو الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار و الگوریتم ژنتیک را در حل مسائل مقید با متغیرهای پیوسته و طراحی مخزن

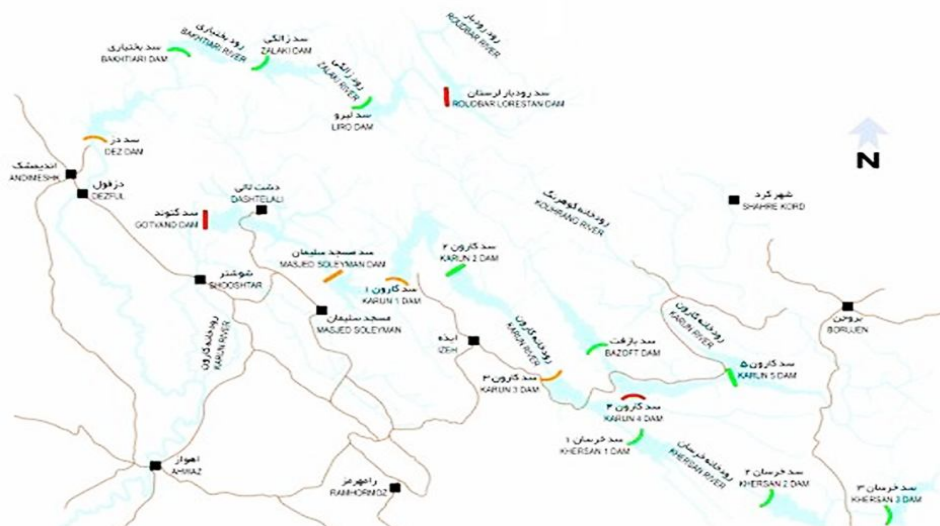
از نظر میزان آب‌دهی دومین رودخانه ایران محسوب می‌شود و در ۴۵ کیلومتری شمال اهواز به رودخانه کارون می‌پیوندد. سد دز از نوع بتنی دوقوسی می‌باشد که ارتفاع آن از پی ۲۰۳ متر و از کف رودخانه ۱۹۰ متر است. عرض بدنه در پی ۲۷ متر و در تاج ۴/۵ متر، طول تاج ۲۱۲ متر و رقوم تاج سد ۳۵۴ متر از سطح دریا می‌باشد. سطح دریاچه در این رقوم به ۶۵ کیلومترمربع می‌رسد (۴). شکل ۱ موقعیت فیزیکی (جانمایی) سد مذکور را نشان می‌دهد.

حجم اولیه مخزن این سد، ۱۴۳۰ میلیون مترمکعب بوده است. میزان حداقل و حداکثر حجم ذخیره‌ی مجاز مخزن به ترتیب ۸۳۰ و ۳۳۴۰ میلیون مترمکعب و نیز حداقل و حداکثر مقدار جریان رهاشده از مخزن به ترتیب صفر و ۱۰۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. همچنین، ضریب کارکرد نیروگاه ۰/۴۱۷، ظرفیت نصب نیروگاه ۶۵۰ مگاوات، بازده ۹۰ درصد و تراز پایاب نیروگاه معادل ۱۷۲ متر از سطح دریا در نظر گرفته شده است.

حل این مسائل، دو فرمول‌بندی پیشنهاد می‌شود که در فرمول‌بندی اول، آب رها شده از مخزن و در فرمول‌بندی دوم، حجم ذخیره مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم منظور می‌شوند. مسائل مذکور با استفاده از هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی حل شده و نتایج با سایر نتایج موجود مقایسه می‌شوند.

### منطقه مورد مطالعه

سیستم تک‌مخزنی دز: در این پژوهش، به‌عنوان مطالعه موردی، مسأله بهره‌برداری بهینه ساده و برقابی از مخزن سد دز در دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتایج بررسی می‌شود. بنابراین، در ابتدا، اطلاعات پایه مورد نیاز این سد ارائه می‌شود. سد دز روی رودخانه دز، در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان دزفول، در استان خوزستان، ساخته شده است. این سد، بلندترین سد ایران و در زمان ساخت نیز مرتفع‌ترین سد مخزنی در خاورمیانه بوده است. رودخانه دز که از ارتفاعات غربی زاگرس (کوه‌های بختیاری) سرچشمه می‌گیرد،



شکل ۱- موقعیت سد دز.

Figure 1. Location map of Dez Dam.

که در آن،  $fitbest$  و  $fitworst$  به ترتیب بهترین و بدترین مقدار تابع هدف،  $fit(i)$  نشان‌دهنده مقدار تابع هدف ذره  $i$  و  $N$  تعداد کل ذرات است.

(۳) فاصله بین دو ذره  $i$  و  $j$  ( $r_{ij}$ ) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{best}\| + \varepsilon} \quad (2)$$

که در آن،  $X_i$  و  $X_j$  به ترتیب  $i$  امین و  $j$  امین ذره (جواب)،  $X_{best}$  بهترین ذره (جواب) و  $\varepsilon$  یک مقدار کوچک و مثبت است.

(۴) در ادامه، احتمال جاذبه میان ذرات طبق تابع زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{fit(i) - fitbest}{fit(j) - fit(i)} > rand \\ 1 \\ \sqrt{fit(j) > fit(i)} \\ 0 \quad else \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $p_{ij}$  احتمال جذب ذره  $i$  ام توسط ذره  $j$  ام و  $rand$  یک عدد تصادفی است. بر این اساس، جذب و حرکت یک ذره بد به سمت یک ذره خوب موجب تسریع همگرایی الگوریتم شده و باعث جذب یک ذره خوب به سمت یک ذره بد، باعث جست‌وجوی فراگیر در فضای جست‌وجوی مسئله می‌شود.

(۵) مقدار برآیند نیروهای الکتریکی وارد بر یک ذره از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار: الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که پیش از این قابلیت‌های آن در زمینه حل مسائل مهندسی و توابع نمونه، بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم مذکور کارایی خوبی دارد. بنابراین استفاده از آن در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی توصیه شده است. در ادامه، روند حل مسئله با استفاده از این الگوریتم به اختصار توضیح داده می‌شود.

در این الگوریتم، هر ذره‌ی باردار  $(CP)$  یک جواب،  $X_i$ ، از مسئله در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم، ابتدا با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از ذرات باردار، روند حل شروع شده و هر ذره تحت تأثیر نیروهای ناشی از میدان الکتریکی ذرات دیگر قرار می‌گیرد. با استفاده از قوانین الکترواستاتیک، برآیند این نیروها و نیز با استفاده از قوانین مکانیک نیوتن میزان جابه‌جایی ذرات بر اثر این نیرو، تعیین می‌شود. در این الگوریتم، مقدار بار یک ذره بر اساس مقدار تابع هدف مسئله تعریف می‌شود. روند کلی این الگوریتم به شکل زیر تعریف می‌شود (۲۰):

(۱) موقعیت اولیه ذرات به‌طور تصادفی در فضای جواب‌ها تعیین و مقدار سرعت اولیه آن‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس تابع هدف مسئله، میزان مطلوبیت ذرات تعیین می‌شود.

(۲) هر ذره، باری به بزرگی  $q_i$  دارد که معادل یک جواب است و بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود (۲۰):

$$q_i = \frac{fit(i) - fitworst}{fitbest - fitworst}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

#### 1- Charged Particles



$$k_v = 0.5(1 - \text{iter}/\text{iter}_{\max}) \quad (8)$$

که در آن،  $\text{iter}$  تعداد تکرار فعلی و  $\text{iter}_{\max}$  بیشترین تعداد تکرارهاست.

(۷) مراحل فوق تا رسیدن به شرط توقف ادامه می‌یابد.

شایان ذکر است که در این الگوریتم به منظور جلوگیری از افزایش محاسبات و نیز در جهت ذخیره‌سازی تعدادی از بهترین جواب‌هایی که تاکنون یافت شده‌اند، یک حافظه به نام CMS<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، مراحل حل یک مسأله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار به اختصار در شکل ۲ ارائه شده است.

در انتها ذکر این نکته ضروری است که در الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار، در راستای شبیه‌سازی عملکرد ذرات باردار در شاخه فیزیکی واقعی، پارامترهایی تعریف می‌شوند که باید با توجه به تعریف مسأله، نوع و شرایط آن، انتخاب گردند. این پارامترها شامل این موارد هستند (۱۸): تعداد جمعیت<sup>۲</sup> (ncps)، حافظه‌ای برای بهترین جواب‌های به‌دست آمده تاکنون (CMS)، شعاع ذره باردار<sup>۳</sup> (a)، متغیرهایی وابسته به موقعیت جدید ذرات باردار (par, cmcr) و متغیرهای ثابتی که به دیگر داده‌ها وابسته‌اند (k<sub>t</sub>, k).

$$F_j = q_j \sum_{i, i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) p_{ij} (X_i - X_j), \quad (9)$$

$$\begin{cases} j = 1, 2, \dots, N, \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a, \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a. \end{cases}$$

که در آن،  $F_j$  نیروی برآیند وارد بر  $j$  امین ذره است. در این الگوریتم، هر ذره به‌عنوان یک کره باردار با شعاع  $a$  که دارای چگالی بار یکنواخت است در نظر گرفته می‌شود.

(۶) بر اساس روابط زیر، مکان ( $X_{j,\text{new}}$ ) و سرعت ( $v_{j,\text{new}}$ ) جدید هر ذره تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} X_{j,\text{new}} &= \text{rand}_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 \\ &+ \text{rand}_{j2} \cdot k_v \cdot v_{j,\text{old}} \cdot \Delta t + X_{j,\text{old}} \end{aligned} \quad (5)$$

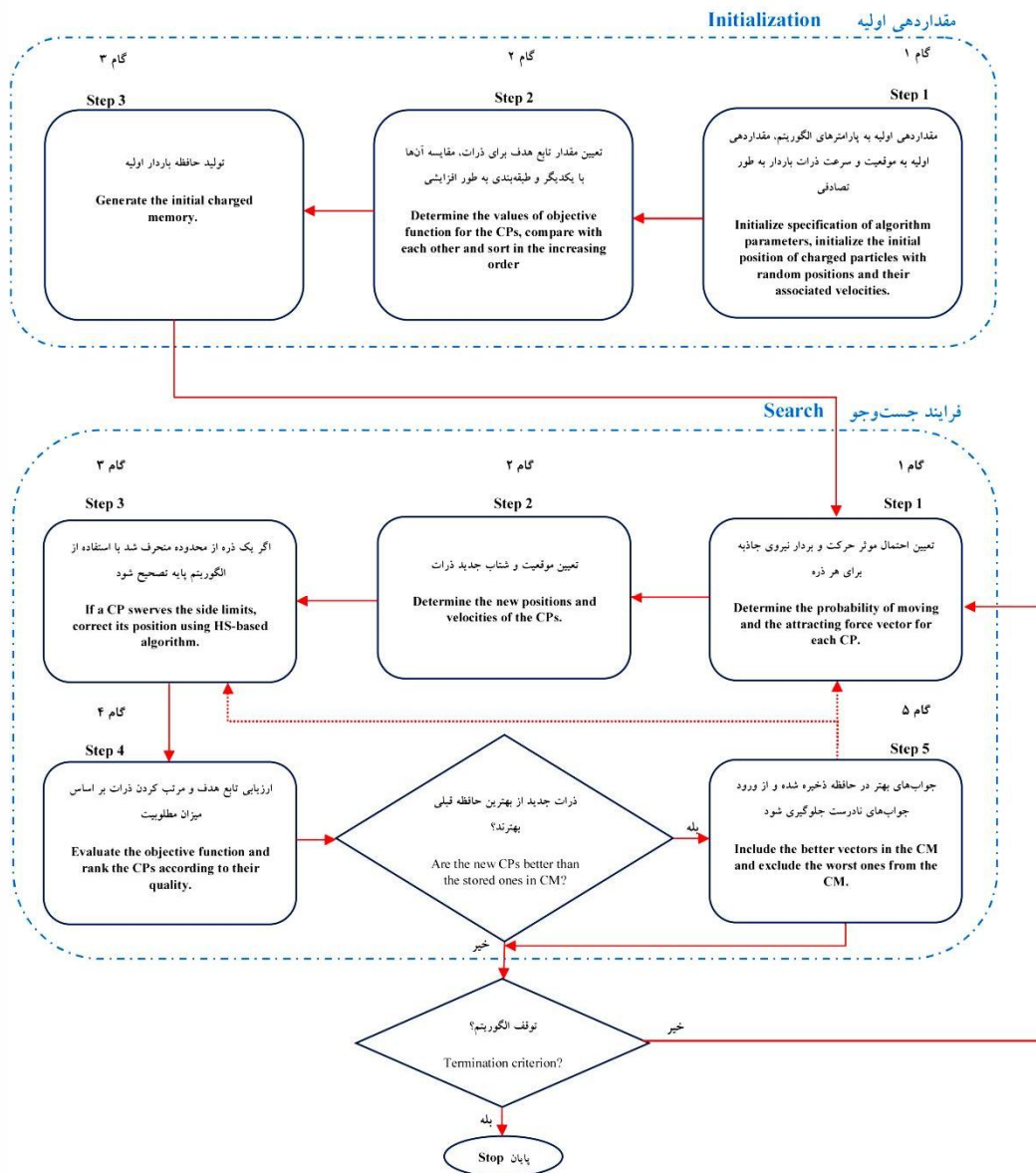
$$v_{j,\text{new}} = \frac{X_{j,\text{new}} - X_{j,\text{old}}}{\Delta t} \quad (6)$$

که در آن،  $k_a$  ضریب شتاب،  $k_v$  ضریب سرعت برای کنترل تأثیر سرعت پیشین،  $\text{rand}_{j1}$  و  $\text{rand}_{j2}$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (0 و 1)،  $m_j$  جرم ذره  $j$  ام که برابر با  $q_i$  فرض می‌شود و  $\Delta t$  تغییرات زمانی و برابر واحد فرض شده است.

شایان ذکر است که در این الگوریتم،  $k_a$  پارامتر کنترل همگرایی و  $k_v$  نیز کنترل‌کننده فرآیند جست‌وجو است، که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_a = 0.5(1 + \text{iter}/\text{iter}_{\max}) \quad (7)$$

- 1- Size of Charged Memory
- 2- Population Size (Number of Charged Particles)
- 3- Radius of Charged Sphere



شکل ۲- روند حل مسأله با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار (۲۰).

Figure 2. Process of solving the problem using Charged System Search Algorithm (20).

بهره‌برداری ساده و برقیابی از یک سیستم تک‌مخزنه حل می‌شود. بنابراین، ابتدا، مدل ریاضی آن‌ها معرفی می‌شود.

تابع هدف مسأله بهره‌برداری ساده به شکل زیر تعریف می‌شود (۲):

$$F = \text{Min} \sum_{t=1}^{NT} \left[ \frac{D_t - r_t}{D_{\max}} \right]^2 \quad (9)$$

مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم سد تک‌مخزنه: در این بخش، مدل ریاضی مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم سد تک‌مخزنه با تعیین متغیر تصمیم مسأله و تعریف تابع هدف و قیود آن معرفی می‌شود. برای این مسأله، دو فرمول‌بندی تعریف می‌شود که در فرمول‌بندی اول، آب رها شده از مخزن و در فرمول‌بندی دوم، حجم ذخیره مخزن، به‌عنوان متغیر تصمیم انتخاب می‌شود. در این پژوهش، دو مسأله

قیود مسائل ساده و برقایی شامل معادلات پیوستگی و حداکثر و حداقل مقدار برای مقادیر حجم ذخیره مخزن و جریان خروجی از مخزن است که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - r_t - L_t \quad (14)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (15)$$

$$r_{min} \leq r_t \leq r_{max} \quad (16)$$

که در آن‌ها،  $S_t$  حجم مخزن در ابتدای دوره زمانی  $t$  ام،  $I_t$  مقدار جریان ورودی به مخزن در دوره زمانی  $t$  ام،  $L_t$  میزان تلفات در دوره زمانی  $t$  ام،  $S_{t+1}$  حجم مخزن در ابتدای دوره زمانی  $t+1$  ام (انتهای دوره زمانی  $t$  ام)،  $S_{min}$  حداقل حجم ذخیره مخزن،  $S_{max}$  حداکثر حجم ذخیره مخزن،  $r_{min}$  حداقل مقدار جریان رها شده از مخزن و  $r_{max}$  حداکثر مقدار جریان رها شده از مخزن می‌باشند.

**تجزیه و تحلیل:** در ابتدا، به منظور محاسبه تراز آب در مخزن سد دز، رابطه حجم-تراز مخزن برای این سد ارائه می‌شود که به شکل رابطه زیر است (۲):

$$H_t = a + b \times S_t + c \times S_t^2 + d \times S_t^3 \quad (17)$$

که در آن، مقادیر  $a = 249/83364$ ،  $b = 0/0587205$ ،  $c = -1/37 \times 10^{-5}$  و  $d = 1/526 \times 10^{-9}$  می‌باشند.

الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار پارامترهایی دارد که به منظور تعیین مقادیر مطلوب آن‌ها لازم است آنالیز حساسیت برای آن‌ها انجام شود. با انجام آنالیز حساسیت، مقادیر مطلوب پارامترهای این الگوریتم در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که این

که در آن،  $NT$  کل دوره زمانی،  $D_t$  مقدار نیاز در دوره زمانی  $t$  ام،  $r_t$  مقدار جریان رها شده از مخزن در دوره زمانی  $t$  ام و  $D_{max}$  بیشینه نیاز در کل دوره‌های زمانی می‌باشند.

همچنین، تابع هدف مسأله بهره‌برداری برقایی به شکل زیر تعریف می‌شود (۲):

$$F = \text{Min} \sum_{t=1}^{NT} \left[ 1 - \frac{P_t}{\text{power}} \right] \quad (10)$$

که در آن،  $NT$  کل دوره زمانی،  $P_t$  توان تولیدی نیروگاه در دوره زمانی  $t$  ام و  $\text{Power}$  ظرفیت نصب نیروگاه می‌باشند. در این رابطه، مقدار توان تولیدی نیروگاه در دوره زمانی  $t$  ام از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p_t = \min \left[ \left( \frac{g \times \eta \times R_t}{PF} \right) \times \left( \frac{h_t}{1000} \right), \text{power} \right] \quad (11)$$

که در آن،

$$h_t = \left[ \frac{H_t + H_{t+1}}{2} \right] - TWL \quad (12)$$

$$H_t = f(S_t) \quad (13)$$

که در آن،  $h_t$  بار آب مؤثر نیروگاه بر حسب متر،  $g$  شتاب ثقل،  $\eta$  بازده نیروگاه،  $PF$  ضریب کارکرد نیروگاه،  $H_t$  تراز مخزن از سطح دریا بر حسب متر که در حالت کلی تابع حجم ذخیره مخزن می‌باشد (رابطه ۱۳)،  $R_t$  میزان دبی آب عبوری از توربین در دوره زمانی  $t$  ام و  $TWL$  تراز پایاب نیروگاه از سطح دریا می‌باشند.

مسائل به‌ازای مقادیر مطلوب پارامترهای جدول ۱ و تعداد جمعیت ۲۰۰ و تعداد تکرار ۲۰۰۰ حل شده است. نتایج به‌دست آمده برای مسائل، پس از ۱۰ بار اجرای برنامه و برای هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی، به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای الگوریتم CSS.

Table 1. Values of parameters in CSS algorithm obtained by sensitivity analysis.

$k_t$	$K$	$par$	$cmcr$	$a$	$CMS$	فرمول‌بندی Formulation	
0.85	1	0.05	0.75	0.75	4	اول (First)	ساده
0.6	15	0.6	0.1	1.25	4	دوم (Second)	Simple
0.7	5	0.05	0.9	1	2	اول (First)	برقایی
0.915	4	0.16	0.9	1.1	4	دوم (Second)	Hydropower

جدول ۲- مقادیر به‌دست آمده برای مسائل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز با استفاده از فرمول‌بندی اول الگوریتم CSS.

Table 2. Values obtained for Dez reservoir operation problems using first formulation of CSS.

تعداد جواب شذنی No. of Feasible Solutions	انحراف معیار نرمال‌سازی شده Scaled Standard Deviation	بیش‌ترین مقدار تابع هدف Maximum Cost	میانگین مقدار تابع هدف Average Cost	کم‌ترین مقدار تابع هدف Minimum Cost	دوره زمانی (سال) Time Period (year)	
10	0.0289	0.7640	0.7355	0.7105	5	ساده
10	0.1428	28.9428	22.4257	18.4184	20	Simple
10	0.0029	7.5107	7.4777	7.4401	5	برقایی
10	0.0668	35.8519	30.9000	28.7888	20	Hydropower

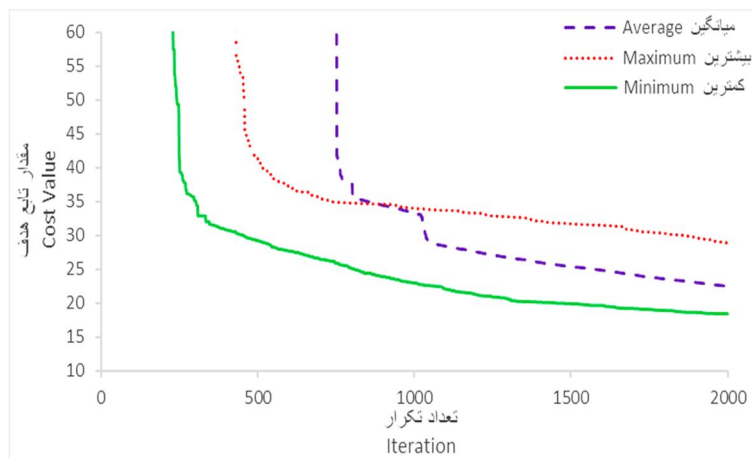
جدول ۳- مقادیر به‌دست آمده برای مسائل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم CSS.

Table 3. Values obtained for Dez reservoir operation problems using second formulation of CSS.

تعداد جواب شذنی No. of Feasible Solution	انحراف معیار نرمال‌سازی شده Scaled Standard Deviation	بیش‌ترین مقدار تابع هدف Maximum Cost	میانگین مقدار تابع هدف Average Cost	کم‌ترین مقدار تابع هدف Minimum Cost	دوره زمانی (سال) Time Period (year)	
10	0.0438	0.9359	0.8968	0.8009	5	ساده
10	0.0664	27.7981	24.5815	22.1075	20	Simple
10	0.0194	9.8040	9.5728	9.3074	5	برقایی
10	0.0273	50.6300	48.0719	46.1833	20	Hydropower

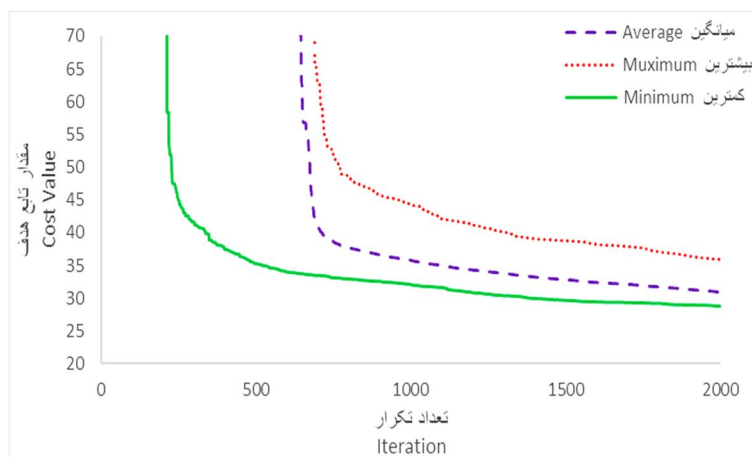
هدف به دست آمده برای مسائل ساده و برقابی در دوره زمانی ۲۰ ساله ارائه شده است. شکل های ۵ و ۶ نیز به منظور مقایسه نتایج و روند تغییرات مقادیر تابع هدف به دست آمده برای مسائل ساده و برقابی در دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از هر دو فرمول بندی پیشنهادی ارائه شده است.

بررسی نتایج ارائه شده نشان دهنده آن است که با استفاده از این الگوریتم جواب های مناسبی برای مسائل حاصل می شود که جواب های فرمول بندی اول از دوم بهتر است. مهم ترین دلیل آن کوچک بودن فضای جست و جو در این فرمول بندی نسبت به فرمول بندی دوم می باشد. در شکل های ۳ و ۴ به ترتیب روند تغییرات میانگین، بیش ترین و کم ترین مقدار تابع



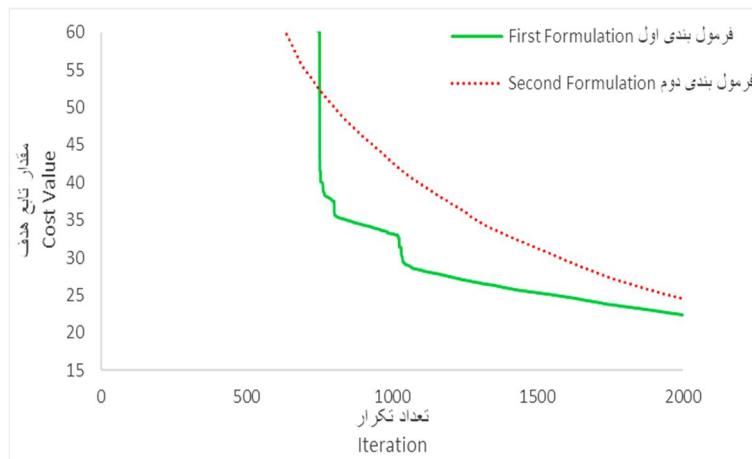
شکل ۳- روند تغییرات میانگین، کم ترین و بیش ترین مقادیر تابع هدف به دست آمده برای مسأله بهره برداری ساده در دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از فرمول بندی اول پیشنهادی.

Figure 3. Variations of average, minimum and maximum solution cost values of simple reservoir operation problem over 20 years of operation period using the first proposed formulation.



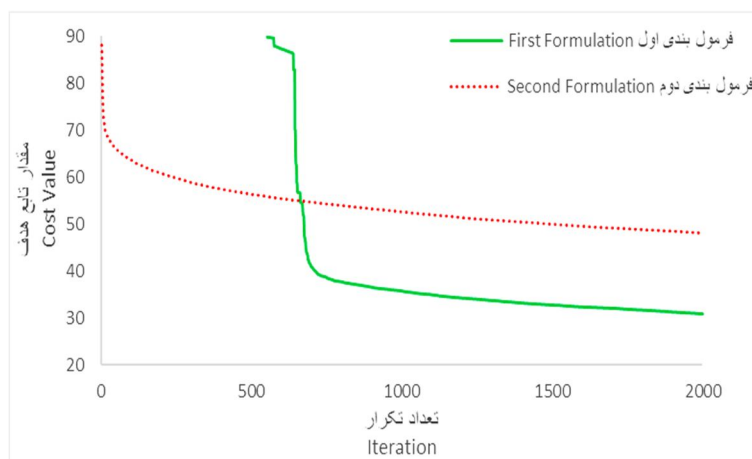
شکل ۴- روند تغییرات میانگین، کم ترین و بیش ترین مقادیر تابع هدف به دست آمده برای مسأله بهره برداری برقابی در دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از فرمول بندی اول پیشنهادی.

Figure 4. Variations of average, minimum and maximum solution cost values of hydropower reservoir operation problem over 20 years of operation period using the first proposed formulation.



شکل ۵- روند تغییرات مقدار میانگین تابع هدف به دست آمده برای مسأله بهره‌برداری ساده در دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی.

Figure 5. Variations of average solution cost values of simple reservoir operation problem over 20 years of operation period using both proposed formulations.



شکل ۶- روند تغییرات مقدار میانگین تابع هدف به دست آمده برای مسأله بهره‌برداری برقایی در دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی.

Figure 6. Variations of average solution cost values of hydropower reservoir operation problem over 20 years of operation period using both proposed formulations.

با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات حاصل شد. همچنین، با استفاده از الگوریتم ژنتیک کم‌ترین مقادیر تابع هدف مسأله بهره‌برداری ساده برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله، ۰/۷۷ و ۲۸/۶۰ و با مقادیر ۰/۶ و ۱/۱۴ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها بود. همچنین، برای مسأله برقایی، مقادیر متناظر تابع هدف به ترتیب ۸/۳۹ و ۸۸/۴۰ و با مقادیر ۰/۱۳ و ۱/۱۲ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها

شایان ذکر است که افشار (۲۰۱۲) مسائل مذکور را با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی ذرات و ژنتیک و به‌ازای تعداد عملگر ارزیابی (حاصل ضرب تعداد جمعیت در تعداد تکرار) ۱۰۰۰۰۰ حل نمود (۱). برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله، کم‌ترین مقدار تابع هدف به دست آمده برای مسأله بهره‌برداری ساده، به ترتیب ۱/۰۷ و ۷۳/۶۰ و با مقادیر ۰/۵ و ۱/۱۴ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها بود که

می‌باشد. همچنین، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله بهره‌برداری ساده (برقایی) از مخزن سد دز برای دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله در مقایسه با نتایج الگوریتم هوش جمعی ذرات به‌ترتیب ۳۳/۶۴ (۱۱/۳۲) و ۷۴/۹۷ (۶۷/۴۳) می‌باشد. علاوه بر این، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نتایج الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مسأله بهره‌برداری ساده از مخزن سد دز برای دوره ۵ ساله ۸/۹۷ و برای مسأله بهره‌برداری برقایی در دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله به‌ترتیب ۵/۹۴ و ۱۸/۴۴ می‌باشد. همچنین، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نتایج الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حل مسأله بهره‌برداری ساده از مخزن سد دز برای دوره ۵ ساله ۲/۷۴ و برای مسأله بهره‌برداری برقایی در دوره ۵ ساله ۰/۸ می‌باشد.

جمع‌بندی و مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که الگوریتم پیشنهادی کارآیی خوبی در حل مسائل نمونه دارد که مهم‌ترین دلیل آن تعامل مناسب بین دو مفهوم اکتشاف و بهره‌برداری است. بررسی نتایج نشان‌دهنده آن است که مقادیر تابع هدف به‌دست آمده برای مسائل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی از سایر الگوریتم‌های مورد استفاده (به غیر از مسائل ساده و برقایی ۲۰ ساله به‌دست آمده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی) بهتر است. همچنین، مقادیر انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها نیز در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد استفاده (به غیر از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی) بهتر است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسائل بهره‌برداری بهینه ساده و برقایی از سد تک‌مخزنه دز با استفاده از الگوریتم

بود که با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات به‌دست آمد. همچنین، مقادیر ۷/۹۶ و ۴۹/۲۰ برای تابع هدف و با مقادیر ۰/۶ و ۱/۰۹ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای مسأله برقایی حاصل شد. معینی و افشار (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان به‌ترتیب مقادیر ۰/۷۸ و ۱۰/۳۱ را برای مسأله بهره‌برداری ساده در دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله و مقادیر ۷/۹۱ و ۳۵/۳۰ را برای مسأله بهره‌برداری برقایی، به‌ازای ۴۰۰۰۰۰ عملگر ارزیابی به‌دست آورده‌اند (۲۵). همچنین، معینی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی و به‌ازای ۱۰۰۰۰۰ عملگر ارزیابی، به‌ترتیب مقادیر ۰/۷۳ و ۸/۲۴ برای تابع هدف در مسأله بهره‌برداری ساده و با مقادیر ۰/۰۴۳ و ۰/۰۶۶ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها و مقادیر ۷/۵۰ و ۲۴/۶۴ برای تابع هدف در مسأله بهره‌برداری برقایی و با مقادیر ۰/۰۳۴ و ۰/۰۲ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله ارائه نمودند (۲۸). در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار و به‌ازای ۴۰۰۰۰۰ عملگر ارزیابی به‌ترتیب در دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله، برای مسأله بهره‌برداری ساده مقادیر ۰/۷۱ و ۱۸/۴۲ برای تابع هدف و با مقادیر ۰/۰۲۸۹ و ۰/۱۴۲۸ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها و برای مسأله بهره‌برداری برقایی مقادیر ۷/۴۴ و ۲۸/۷۹ برای تابع هدف و با مقادیر ۰/۰۲۹ و ۰/۰۶۶۸ برای انحراف معیار نرمال‌سازی شده جواب‌ها حاصل شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که، درصد بهبود مقادیر تابع هدف به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در حل مسأله بهره‌برداری ساده (برقایی) از مخزن سد دز برای دوره‌های ۵ و ۲۰ ساله در مقایسه با نتایج الگوریتم ژنتیک به‌ترتیب ۷/۷۹ (۶/۵۳) و ۳۵/۵۹ (۴۱/۴۸)

برای مسائل حاصل شد که جواب‌های فرمول‌بندی اول از فرمول‌بندی دوم مناسب‌تر بود. همچنین، نتایج به‌دست آمده از الگوریتم جست‌وجوی ذرات باردار از سایر نتایج موجود بهتر بود. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از این الگوریتم در حل سایر مسائل حوزه مهندسی آب و به‌ویژه مسأله پیچیده بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه توصیه می‌شود.

جست‌وجوی ذرات باردار در دو فرمول‌بندی برای دوره‌های زمانی ۵ و ۲۰ ساله حل و نتایج بررسی و ارزیابی شد. برای حل این مسائل، دو فرمول‌بندی ارائه شد که در فرمول‌بندی اول، آب رها شده از مخزن و در فرمول‌بندی دوم، حجم ذخیره مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شد. بررسی نتایج نشان داد که با استفاده از این الگوریتم، جواب‌های مناسب

### منابع

1. Afshar, M.H. 2012. Large Scale Reservoir Operation by Constrained Particle Swarm Optimization Algorithms. *Hydro-environment Research*. 6: 75-87.
2. Afshar, M.H., and Moeini, R. 2008. Partially and Fully Constrained Ant Algorithms for the Optimal Solution of Large Scale Reservoir Operation Problems. *Water Resources Management*. 22: 1835-1857.
3. Afshar, A., Bozorg Haddad, O., Marino, M.A., and Adams, B.J. 2007. Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation. *J. Franklin Ins.* 344: 452-462.
4. Afshar, M.H., Rezaee Sangdehi, E., and Moeini, R. 2011. Optimal Reservoir Operation using Deterministic Adaptive Refinement Mechanism for Ant Algorithm. *J. Civil Engin.* 23: 1. 65-84. (In Persian)
5. Bashiri-Atrabi, H., Qaderi, K., Rheinheimer, D., and Sharifi, E. 2015. Application of Harmony Search Algorithm to Reservoir Operation Optimization. *Water Resources Management*. 29: 15. 5729-5748.
6. Bozorg Hadad, O., Afshar, A., and Marino, M.A. 2006. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization. *Water Resources Management*. 20: 661-680.
7. Chang, L., Chang, F.J., Wang, K.W., and Dai, S.Y. 2010. Constrained Genetic Algorithm for Optimizing Multi-Use Reservoir Operation. *J. Hydrol.* 390: 66-74.
8. Choong, S.M., and El-Shafie, A. 2014. State-of-the-Art for Modelling Reservoir Inflows and Management Optimization. *Water Resources Management*. 20: 1-16.
9. Ehteram, M., Karami, H., Mousavi, S.F., El-Shafie, A., and Amini, Z. 2017a. Optimizing dam and reservoirs operation based model utilizing shark algorithm approach. *Knowledge-Based Systems*. 122: 26-38.
10. Ehteram, M., Mousavi, S.F., Karami, H., Farzin, S., Emami, M., Binti Othman, F., Amini, Z., Kisi, O., and El-Shafie, A. 2017b. Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. *Advanced Engineering Informatics*. 32: 287-298.
11. Esat, V., and Hall, M.J. 1994. Water resources system optimization using genetic algorithms. *Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Hydroinformatics*. Balkema. Rotterdam. The Netherlands, Pp: 225-231.
12. Hossain, M.S., and El-Shafie, A. 2014a. Evolutionary Techniques Versus Swarm Intelligences: Application in Reservoir Release Optimization. *Neural Computing and Applications*. 24: 1583-1594.
13. Hossain, M.S., and El-Shafie, A. 2014b. Performance Analysis of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm in Optimizing Release Policy of Aswan High Dam. *Neural Computing and Applications*. 24: 1199-1206.



14. Hosseini, S.S., Ghodousian, A., and Mansouri, M. 2013. Optimizing the size and shape of two-dimensional w using the Charged System Search Algorithm. National Conference on Mechanical Engineering of Iran. Shiraz University, Shiraz. (In Persian)
15. Hosseini-Moghari, M., and Banihabib, M.E. 2014. Optimizing Operation of Reservoir for Agriculture Water Supply Using Firefly Algorithm. J. Water Soil Resour. Cons. 3: 17-31. (In Persian)
16. Karami Mohamadi, R., and Kargar, H. 2013. Structural health monitoring and diagnosis of steel bridge damage based on model information using the Charged System Search Algorithm. Third International Conference on Acoustic and Vibration. Iran Acoustic and Vibration Association. Khaje Nasir Tossi University of Technology, Tehran. (In Persian)
17. Kaveh, A., and Nasrollahi, A. 2014. Charged System Search and Particle Swarm Optimization Hybridized for Optimal Design of Engineering Structures. Scientia Iranica A. 21: 295-305.
18. Kaveh, A., and Nikaeen, M. 2013. Optimum Design of Irregular Grillage Systems Using CSS and ECSS Algorithms with Different Boundary Conditions. Inter. J. Civil Engin. 11: 3. 143-153.
19. Kaveh, A., and Shokohi, F. 2014. Cost Optimization of Castellated Beams Using Charged System Search Algorithm. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civil Engin. 38: 100. 235-249.
20. Kaveh, A., and Talatahari, S. 2010a. A Novel Heuristic Optimization Method: Charged System Search. Acta Mechanica. 213: 3-4. 267-289.
21. Kaveh, A., and Talatahari, S. 2010b. A Charged System Search with a Fly to Boundary Method for Discrete Optimum Design of Truss Structures. Asian J. Civil Engin. 11: 3. 277-293.
22. Kaveh, A., and Talatahari, S. 2010c. Charged System Search for Optimum Grillage System Design Using the LRFD-AISC Code. J. Cons. Steel Res. 66: 6. 767-771.
23. Kaveh, A., and Talatahari, S. 2011. An Enhanced Charged System Search for Configuration Optimization Using the Concept of Fields of Forces. Structural and Multidisciplinary Optimization. 43: 339-351.
24. Kaveh, A., and Zolghadr, A. 2011. Shape and Size Optimization of Truss Structures with Frequency Constraints Using Enhanced Charged System Search Algorithm. Asian J. Civil Engin. 12: 4. 487-509.
25. Moeini, R., and Afshar, M.H. 2009. Application of an Ant Colony Optimization Algorithm for Optimal Operation of Reservoirs: A Comparative Study of Three Proposed Formulations. Scientia Iranica. 16: 4. 273-285.
26. Moeini, R., and Afshar, M.H. 2013. Extension of the Constrained Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Operation of Multi-reservoir Systems. J. Hydroinf. 15: 155-173.
27. Moeini, R., and Babaei, M. 2017. Constrained Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Operation of Large Scale Reservoir: Proposing Three Approaches. Evolving Systems. 8: 4. 287-301.
28. Moeini, R., Soltani-Nezhad, M., and Daei, M. 2017. Constrained Gravitational Search Algorithm for Large Scale Reservoir Operation Optimization Problem. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 62: 222-233.
29. Mohamadi, M., and Mashayekhi, M. 2013. Optimization of the topology of double layer bedspace structure using Charged System Search Algorithm. National Conference on Applied Civil Engineering and Recent Achievement. Saze Kavir Company, Karaj. (In Persian)
30. Norozi, B., Barani, Gh.A., Fatahihalghi, M., and Dehghani, A.A. 2013. A Multi-reservoir System Operation Optimization Using Multi-population Genetic Algorithm, Case Study Golestan and Voshmgir Reservoirs. J. Water Soil Cons. 18: 4. 43-62. (In Persian)
31. Rani, D., and Moreira, M.M. 2010. Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. Water Resources Management. 24: 1107-1138.

- 32.Reddy, M.J., and Kumar, D.N. 2006. Ant Colony Optimization for Multi-purpose Reservoir Operation. *Water Resources Management*. 20: 879-889.
- 33.Rohami, H., and Javanmardi, R. 2013. Comparison of the performance of two algorithms of the Charged System Search Algorithm and Genetic Algorithm for solving constrained problems with continuous variables. *First National Conference on Architecture, Restoration, Urbanism and Sustainable Environment*. Hegmatane Environment Evaluators Association, Hamadan. (In Persian)
- 34.Saberi, M., and Kaveh, A. 2015. Damage Detection of Space Structures Using Charged System Search Algorithm and Residual Force Method. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civil Engin.* 39: C2. 215-229.
- 35.Sayyafzadeh, M., Haghghi, M., Bolouri, K., and Arjomand, E. 2012. Reservoir Characterisation Using Artificial Bee Colony Optimization. *APPEA J.* 52: 115-128.
- 36.Sheikholeslami, A., Kaveh, A., Tahershamsi, A., and Talatahari, S. 2014. Application of Charged System Search Algorithm to Water Distribution Networks Optimization. *Inter. J. Optim. Civil Engin.* 4: 1. 41-58.
- 37.Wang, K.W., Chang, L.C., and Chang, F.J. 2011. Multi-tier Interactive Genetic Algorithms for the Optimization of Long-term Reservoir Operation. *Advances in Water Resources*. 34: 1343-1351.
- 38.Yasar, M. 2016. Optimization of Reservoir Operation Using Cuckoo Search Algorithm: Example of Adiguzel Dam, Denizli, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*. ID 1316038:1-7.
- 39.Zahedi, M.S., Hosseini, K.H., and Rahmani, A. 2011. Optimization of water supply network using Charged System Search Algorithm. M.Sc. Thesis. Semnan University, Semnan. (In Persian)
- 40.Zhang, J., Wu, Z., Cheng, C., and Zhang, S. 2011. Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Multi-reservoir System Operation. *Water Science and Engineering*. 4: 1. 61-73.



## Optimal operation of single-reservoir system of Dez dam using Charged System Search Algorithm

T.S. Farahnakian<sup>1</sup>, \*R. Moeini<sup>2</sup> and S.F. Mousavi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Hydraulic Structure, Semnan University, <sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Isfahan, <sup>3</sup>Professor, Dept. of Hydraulic Structure, Semnan University

Received: 08/07/2017; Accepted: 02/04/2018

### Abstract

**Background and Objectives:** Nowadays, water scarcity is a major challenge for our country, Iran. Therefore, storage and optimal operation of limited resources, including water stored in dams' reservoirs, is one of the issues of interest for researchers in the field of water resources. In this paper, optimization of single-reservoir operation problem is solved by using one of the newest heuristic algorithms, named Charged System Search algorithm. Generally, this algorithm is based on the electrostatics laws to determine the quantity of resultant force. Kaveh and Talatahari (2010a) proposed this algorithm for the first time and examined its capabilities for solving engineering problems and sample functions. Results showed that the algorithm has good performance. Therefore, its use for solving engineering optimization problems is recommended. However, a review of literature shows that using of this algorithm is very limited in the field of water resources engineering.

**Materials and Methods:** In this paper, the simple and hydropower operation of Dez Reservoir, over 5 and 20 years of operation period are solved using the proposed algorithm. In order to solve these problems, two different formulations are proposed considering water release or storage volume as decision variables of the problem in the first and second formulations, respectively and the results are compared to other available methods.

**Results:** Comparison of the results shows the capability of the proposed algorithm, in which the results of first formulation are better than the second one's. In other words, the results of first formulation for solving simple operation problem over 5 and 20 years are reduced by 11.29% and 16.69% in comparison with the results of second formulation and also the results are improved by 20.06% and 37.66% using the first formulation for solving hydropower problem. Furthermore, the results of the proposed algorithm for solving simple operation problem over 5 and 20 years are reduced by 33.64% and 74.97% in comparison with the results of Particle Swarm Optimization algorithm and also the results of using the proposed algorithm for solving hydropower problem are improved by 6.53% and 41.48%. In addition, the results of the proposed algorithm for solving simple operation problems over 5 and 20 years are reduced by 7.79% and 35.59% in comparison with the results of Genetic Algorithm and also the results of using proposed algorithm for solving hydropower problem are improved by 11.32% and 67.43%.

**Conclusion:** Investigating these results with the results obtained by using other existing algorithms indicates a better performance of the Charged System Search algorithm for solving the reservoir operation optimization problem. According to these results, the use of this algorithm is recommended for solving other problems in the field of water engineering.

**Keywords:** Charged system search algorithm, Optimal operation, Single-reservoir system, Dez reservoir

---

\* Corresponding Author; Email: r.moeini@eng.ui.ac.ir

