

## Performance Evaluation of Improved Charged System Search Algorithm for Operation Optimization of Reservoir System

M.H. Rabiei<sup>1</sup>, M.T. Aalami<sup>2</sup>, and S. Talatahari<sup>3\*</sup>

### Abstract

After construction of dams according to different needs, the most important issue addressed by the exploiters and researchers is the issue of optimum operation management of reservoirs. In recent years, various meta-heuristic optimization techniques have been used for the reservoir operation optimization. In this study, an improved version of Charged System Search algorithm is presented to enhance the exploration ability and escape from local optima. For this purpose, a special mutation operator is used and a Mutant Charged System Search algorithm is introduced. Then, the validation and evaluation of the efficiency of this new improved algorithm are compared with other well-known meta-heuristic algorithms in solving the mathematical benchmark optimization problems. The new method achieves optimal results for 17 functions out of 18 functions. The proposed algorithm is used to solve two benchmark problems of operations of multireservoir system, namely four- and ten-reservoir systems. Accordingly, the best values are obtained 308.29 and 1194.23, respectively. Finally, the efficiency of the algorithm for optimizing the operation of the two-reservoir system (Gorgan-Rood basin dams) is evaluated using various performance evaluation criteria. The results show the proper performance of the CSS algorithm and its mutated version in solving the multi-reservoir operation optimization problems. According to the results, the best solution achieved by the proposed algorithm is 0.22. Also, this algorithm showed the best performance by providing 94.63% and 95.30% of total demands of Golestan- Voshmgir multi-reservoir system.

**Keywords:** Charged System Search Algorithm, Optimal Operation, Multi-Reservoir System, Mutation Operator.

Received: February 22, 2018

Accepted: September 15, 2019

## ارزیابی عملکرد الگوریتم فراکاوشی جستجوی ذرات باردار بهبود یافته در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن

محمدحسین ربیعی<sup>۱</sup>، محمدتقی اعلمی<sup>۲</sup>  
و سیامک طلعت‌اهری<sup>۳\*</sup>

### چکیده

در سالهای اخیر از انواع روشهای بهینه‌یابی فراکاوشی در مسائل مربوط به بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن استفاده شده است. در این تحقیق نسخه بهبود یافته الگوریتم جستجوی ذرات باردار برای افزایش قابلیت جستجوی سراسری الگوریتم و جلوگیری از گیر افتادن در بهینه محلی ارائه شده است. بدین منظور از نوعی عملگر جهش استفاده شده و الگوریتم جستجوی ذرات باردار جهش یافته معرفی شده است. سپس به صحت‌سنجی و ارزیابی کارایی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های معتبر فراکاوشی در حل مسائل بهینه‌سازی استاندارد ریاضی پرداخته شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، الگوریتم پیشنهادی بهترین عملکرد را در ۱۷ تابع از ۱۸ تابع مورد ارزیابی در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها از خود نشان داد. در ادامه از الگوریتم پیشنهادی جهت بهینه‌سازی دو مسأله مرجع سامانه چهار و ده مخزنه استفاده و با نتایج بدست آمده از سایر الگوریتم‌ها مقایسه شد. بر این اساس بهترین مقادیر تابع هدف به ترتیب برابر ۳۰۸/۲۹ و ۱۱۹۴/۲۳ بدست آمد. در پایان کارایی الگوریتم در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم دو مخزنه (سدهای حوضه آبریز گرگان‌رود) با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم فراکاوشی جستجوی ذرات باردار و نسخه جهش یافته آن در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن می‌باشد. بطوریکه کمترین مقدار تابع هدف برابر با ۰/۲۲ توسط الگوریتم پیشنهادی حاصل شد. همچنین این الگوریتم به ترتیب با تأمین ۹۴/۶۳ و ۹۵/۳۰ درصد از نیازهای کل پایین‌دست سدهای گلستان و وشمگیر عملکرد مناسبی از خود نشان داد.

**کلمات کلیدی:** الگوریتم جستجوی ذرات باردار، بهره‌برداری بهینه، سامانه‌های چندمخزنه، عملگر جهش.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲۴

1- Ph.D. Graduate of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Professor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Associate Professor of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی عمران - آب، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی عمران - آب، دانشگاه تبریز.

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران - سازه، دانشگاه تبریز.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

و افزایش انرژی برقایی در نظر گرفتند. (Reddy and Kumar (2007) با استفاده از الگوریتم PSO و با بهره‌گیری از تکنیک وزن‌دهی و تبدیل مسأله چندهدفه به تک‌هدفه همچنین فرآیندهای تکاملی نظیر نخبه‌گرایی و جهش در فرآیند جستجوی تک‌هدفه، مسأله بهره‌برداری از مخزن با اهداف کشاورزی و تولید برقایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. (Fallah and Bozorg Haddad (2011) به مقایسه برنامه‌ریزی غیرخطی با روش بهینه‌سازی الگوریتم چند هدفه بهینه‌سازی مجموعه ذرات<sup>۷</sup> (MOPSO) در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد بازفت با اهداف تولید انرژی برقایی، تأمین نیاز پایین دست (شرب، صنعت و کشاورزی)، کنترل سیلاب و تفریحات پرداختند. جواب‌های الگوریتم MOPSO با متوسط ۰/۳ درصد اختلاف با NLP، قابلیت زیادی را در ارائه جواب‌های بهینه در نقاط انتهایی مجموعه جواب‌ها داشت. (Arunkumar and Jothiprakash (2013) کاربرد الگوریتم تکاملی بهبود یافته<sup>۸</sup> (CDE) را در بهره‌برداری بهینه از یک سیستم دو مخزنه در هند جهت دستیابی به بیشترین انرژی برقایی و تأمین نیاز کشاورزی توسط سناریوهای مختلف، ارزیابی کردند. اساس این الگوریتم بهبود یافته بر مبنای تئوری آشوبی برای تولید جمعیت اولیه و همچنین عملگرهای جهش و تقاطع بنا نهاده شد. نتایج بدست آمده با الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی استاندارد مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از تئوری آشوبی باعث کاهش جمعیت مورد نیاز و همچنین تسریع همگرایی به بهینه مطلق می‌شود. (Schardong et al. (2013) از رویکرد تکاملی چندهدفه برای بهره‌برداری بهینه مخزن استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم چندهدفه تکامل تفاضلی<sup>۹</sup> (MODE) به بهره‌برداری بهینه بخشی از یک سیستم پیچیده مخزن واقع در جنوب غربی برزیل که آب را برای حدود ۲۰ میلیون نفر در منطقه شهری سائوپائولو تأمین می‌کند، پرداختند. اهداف مورد مطالعه شامل به حداقل رساندن کمبودها (تفاوت بین تقاضا و آب تخصیص داده شده)، حداکثر کیفیت آب (یا حداقل انحراف از استانداردهای کیفیت آب) و به حداقل رساندن هزینه پمپاژ بوده است. همچنین الگوریتم توسعه داده شده با الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۱۰</sup> (NSGA-II) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از همگرایی نزدیک‌تری به جبهه پرتو واقعی در الگوریتم پیشنهادی بود. (Afshar (2013) با معرفی سه نسخه از الگوریتم مجموعه ذرات مقید، به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه چند مخزن پرداختند. اساس کار این نسخه‌های بهبود یافته بر مبنای مکانیزم ساختاری حل بُعد به بُعد در الگوریتم مجموعه ذرات بوده به طوری که با اعمال قیودات مسأله بهره‌برداری از مخزن در هر مرحله از اجرای الگوریتم، منجر به محدود کردن فضای جستجو به دامنه‌های امکان‌پذیر برای متغیرهای تصمیم می‌شود که با این کار عملاً امکان تخطی از فضای جستجو در ساختار الگوریتم از بین می‌رود. نتایج حاکی از برتری عملکرد

یکی از جنبه‌های مهم بررسی سامانه مخازن، مدیریت آن‌ها است. اولین قدم در مدیریت، با مفهوم کلی استفاده مطلوب از منابع موجود، برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری در مدت‌زمان مشخص است و اولویت اول در برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی است. در سال‌های اخیر توجه به مفهوم بهینه‌سازی در مدیریت سامانه مخازن بیشتر شده و روش‌های بهینه‌سازی مختلفی توسعه یافته‌اند. در این بین، توجه به توسعه و استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و فراکاشی روزبه‌روز افزایش یافته و به دلیل روند بهینه‌سازی منحصر به فردی که این الگوریتم‌ها دارند، امکان دستیابی به جواب‌های بهینه مطمئن‌تر و مطلوب‌تر را فراهم کرده‌اند. این روش‌ها با الگو گرفتن از فرآیندهای موجود در طبیعت به جستجوی فضای تصمیم می‌پردازند. اگرچه روش‌های مدرن در مسأله‌های مشابه گاهی دقت و اطمینان روش‌های کلاسیک را ندارند، ولی فرار از بهینه‌های موضعی، سادگی کاربرد، عدم نیاز به محاسبه مشتق‌ها و توانایی حل و ارائه جواب برای مسأله‌های پیچیده مهندسی را می‌توان از مهم‌ترین برتری‌های آن‌ها برشمرد. این روش‌ها به جای دستیابی به جواب‌های بهینه مطلق، به جواب‌های نزدیک به بهینه می‌رسند (که البته از نظر مهندسی کارآمدی لازم را دارند) (Seifollahi-Aghmiuni, 2015). از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> (GA) (Holland, 1975)، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان<sup>۲</sup> (ACO) (Dorigo, 1992)، الگوریتم مجموعه ذرات<sup>۳</sup> (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995)، الگوریتم تکامل تفاضلی<sup>۴</sup> (DE) (Storn & Price, 1995)، الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۵</sup> (HS) (Geem et al., 2001)، الگوریتم جفت‌گیری زنبورهای عسل<sup>۶</sup> (HBMO) (Bozorg Haddad et al., 2006) و غیره اشاره کرد. در دو دهه اخیر محققین زیادی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاشی به حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های تک‌مخزنه و چندمخزنه پرداخته‌اند. (Chang et al. (2005) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مقدار رهاسازی آب در ۱۲ بازه زمانی ماهیانه استفاده کردند. بیشینه کردن مقدار تولید نیروی برقایی مخزن چندمنظوره شیمین در تایوان هدف مورد نظر آن‌ها بود. مقایسه نتایج به دست آمده از GA با سایر روش‌ها نشان از برتری آن بود. (Kumar and Reddy (2006) از الگوریتم ACO، برای استخراج قواعد بهره‌برداری سیستم مخزن چندهدفه هیراکود واقع در هندوستان استفاده کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن سری‌های زمانی محدود جریان ورودی، طبقه‌بندی حجم مخزن و محاسبه میزان رهاسازی مخزن برای هر دوره با در نظر گرفتن معیارهای بهینه از قبل تعریف شده، مدل ACO را فرمول‌بندی کردند. آن‌ها اهداف چندگانه را به صورت کمینه‌کردن خطر سیل، کمینه‌کردن کمبودهای آب مورد نیاز کشاورزی

حاصل از الگوریتم ترکیبی را با نتایج الگوریتم‌های استاندارد مقایسه کردند و نشان دادند که الگوریتم ترکیبی علاوه بر بهبود جواب‌های نهایی، دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های استاندارد خود دارد. بر اساس نتایج بدست آمده بهترین مقادیر تابع هدف برای سامانه‌های مذکور به ترتیب برابر با  $1/212$ ،  $308/29$  و  $1194/44$  حاصل شد. (Afshar and Hajiabadi (2018) به بررسی بهینه‌سازی مخزن دو منظوره سد در جهت تأمین نیاز پایین دست و تأمین نیروی برقابی با استفاده از روش جدید اتوماتای سلولی موازی<sup>۱۸</sup> (PCA) برای دوره‌های بهره‌برداری ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۴۸۰ ماهه پرداختند. ایشان دو روش اتوماتای سلولی موازی را جهت جستجوی بهترین جواب هر یک از توابع هدف در نظر گرفتند. نتایج جبهه پارتوی بدست آمده حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم NSGA-II به خصوص در حل مسائل بزرگ مقیاس بود. (Rabiei et al. (2018) کاربرد سه الگوریتم جدید بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد<sup>۱۹</sup> (CBO)، نسخه بهبود یافته آن<sup>۲۰</sup> (ECBO) و سیستم ذرات نوسانی<sup>۲۱</sup> (VPS) در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های چندمخزنه بررسی کردند. نتایج حاکی از توانایی برتر الگوریتم VPS در سرعت همگرایی و کاهش هزینه محاسباتی در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها داشت. بر اساس مقادیر تابع هدف بدست آمده از این الگوریتم برای سامانه‌های چهار و ده مخزنه، به ترتیب  $99/72\%$  و  $99/56\%$  به جواب بهینه بدست آمده از روش NLP نزدیکتر هستند. آن‌ها همچنین ثابت کردند اگرچه استقلال پارامتری از مزیت‌های مهم الگوریتم CBO است، لیکن نتایج نشان از برتری نسخه بهبود یافته آن (ECBO) داشت.

مرور تحقیقات گذشته در مورد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی، نشان می‌دهد که توسعه الگوریتم‌ها به صورت تک‌هدفه و چندهدفه به وفور انجام شده است. همچنین، کاربرد انواع مختلف الگوریتم‌ها با راه‌کارهای پیشنهادی جهت بهبود روند بهینه‌سازی، در مسائل گوناگون مهندسی منابع آب نیز صورت گرفته است. کاربردهای گسترده، سهولت استفاده، عملکرد بالا و چشم‌انداز کلی الگوریتم‌های فراکاوشی می‌تواند به عنوان دلایل اولیه برای کاربرد گسترده و موفقیت آن‌ها به عنوان ابزار بهینه‌سازی در مسائل بهره‌برداری سامانه مخازن تلقی گردد. با این وجود و بر مبنای تئوری (No free lunch)، یک الگوریتم فراکاوشی قادر به حل تمامی مسائل بهینه‌سازی نیست. در واقع یک الگوریتم فراکاوشی تنها زمانی می‌تواند به عنوان مناسب‌ترین روش برای حل یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شود که به طور ویژه برای همان مسئله توسعه داده شود (Wolpert and Macready, 1997). لذا در تحقیق حاضر برای اولین بار کاربرد یکی از جدیدترین الگوریتم‌های

الگوریتم‌های مقید در مقایسه با الگوریتم استاندارد PSO بود به طوری که مقادیر تابع هدف با استفاده از الگوریتم مجموعه ذرات مقید کامل<sup>۱۱</sup> (FCPSO) به ترتیب برابر  $308/4$  و  $1194/05$  بدست آمد. (Bozorg Haddad et al. (2014) با استفاده از الگوریتم چرخه آب<sup>۱۲</sup> (WCA) به بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه کارون ۴ با هدف تولید برقابی و یک سیستم چهارمخزنه پرداختند و نتایج خود را با الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی غیر خطی<sup>۱۳</sup> (NLP) مقایسه کردند. مقادیر میانگین بدست آمده برای تابع هدف توسط این الگوریتم نشان دهنده  $96\%$  و  $99\%$  نزدیکی به جواب بهینه مطلق به ترتیب برای سیستم تک‌مخزنه و چهارمخزنه بود. آن‌ها همچنین توانایی همگرایی سریع و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم اثبات کردند. (Asghari et al. (2015) الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز<sup>۱۴</sup> (IWO) را در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد بازفت در چهارمحال و بختیاری بکار گرفتند. نتایج مقایسه این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی نشان داد که این الگوریتم برای بهینه کردن مقدار تابع هدف، نتایج رضایت بخشی در سرعت همگرایی نسبت به سایر روش‌ها دارد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار تابع هدف به دست آمده از الگوریتم IWO برای حالت تک مخزنه،  $38/79$  درصد و برای مسأله چهار مخزنه  $2/53$  درصد بهتر از الگوریتم ژنتیک بود. (Ming et al. (2017) به منظور کاهش بار محاسباتی مربوط به مسأله بهره‌برداری بلند مدت سامانه مخازن، یک روش جدید مبتنی بر کاهش فضای جستجوی متغیرهای تصمیم با در نظر گرفتن معادله تعادل و قیودات مخازن ارائه کردند. ایشان با ترکیب روش پیشنهادی خود در ساختار الگوریتم برنامه‌ریزی پویا گسسته<sup>۱۵</sup> (DDP) و الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۱۶</sup> (CS) به ارزیابی عملکرد آنها در بهینه‌سازی سامانه مخازن با هدف تولید نیروی برقابی پرداختند. نتایج حاکی از کاهش چشمگیر هزینه محاسباتی و همچنین سرعت همگرایی مناسب روش پیشنهادی علی‌رغم رسیدن به جواب‌های یکسان در مقایسه با الگوریتم‌های استاندارد اولیه بود. (Afshar et al. (2017) ترکیبی از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی و اتوماتای سلولی را ارائه و برای بهینه‌سازی مسأله بزرگ مقیاس بهره‌برداری سامانه چهار مخزنه با هدف تولید نیروی برقابی استفاده کردند. ایشان از مفاهیم اولیه الگوریتم اتوماتای سلولی برای تبدیل مسأله بزرگ مقیاس چند مخزنه به چندین زیر مجموعه کوچکتر تک مخزنه استفاده کرده و هر یک را با روش جستجوی هارمونی برای دوره‌های بهره‌برداری ۱۲، ۶۰ و ۲۴۰ ماهه حل کردند. نتایج مقایسه با الگوریتم‌های معتبر دیگر از جمله PSO و GA حاکی از برتری الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در رسیدن به جواب بهینه بود. (Ehteram et al. (2017) با معرفی یک الگوریتم ترکیبی از ژنتیک و کریل<sup>۱۷</sup> به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های تک مخزنه، چهارمخزنه و ده‌مخزنه پرداختند. آن‌ها نتایج

فراکاوشی در دهه اخیر در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- الگوریتم جستجوی سیستم ذرات باردار و نسخه بهبود یافته آن

الگوریتم جستجوی سیستم ذرات باردار<sup>۲۲</sup> (CSS) اولین بار توسط Kaveh and Talatahari (2010) معرفی شد. این روش، مبتنی بر قانون کولمب از فیزیک و قانون حرکت از مکانیک نیوتنی است. در این الگوریتم هر کاندیدای حل شامل تعدادی متغیر است که به‌عنوان یک ذره باردار در نظر گرفته می‌شود. هر ذره باردار تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی دیگر ذرات قرار دارد. کمیت نیروی وارد بر این ذره، با استفاده از قوانین الکترواستاتیکی و کیفیت حرکت این ذره، با استفاده از قوانین مکانیک نیوتنی محاسبه می‌شود. یک ذره با نتایج خوب در مقایسه با ذرات بدتر از خود باید یک نیروی قوی‌تری را وارد کند؛ بنابراین مقدار بار ذره ( $q_i$ ) با در نظر گرفتن مقدار تابع شایستگی ( $fit(i)$ )، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_i = \frac{fit(i) - fit_{worst}}{fit_{best} - fit_{worst}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که در این رابطه  $fit_{best}$  و  $fit_{worst}$  بهترین و بدترین مقدار تابع شایستگی همه ذرات تا تکرار کنونی است؛  $fit(i)$  برابر با مقدار تابع شایستگی ذره  $i$  است و  $N$  برابر با تعداد کل ذرات باردار است. فاصله میان دو ذره باردار ( $r_{ij}$ ) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

$X_i$  و  $X_j$  موقعیت‌های  $i$  امین و  $j$  امین ذره است.  $X_{best}$  موقعیت بهترین ذره در میان جمعیت است و  $\epsilon$  یک عدد مثبت کوچکی است که برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر به کار می‌رود. احتمال حرکت یک ذره به سمت دیگر ذرات برابر است با:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{fit(i) - fit_{best}}{fit(j) - fit(i)} > rand \vee fit(j) > fit(i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

مقادیر برآیند نیروی الکتریکی که به یک ذره وارد می‌شود با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_j = q_i \sum_{i=1, i \neq j}^N \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}} i_2 \right) ar_{ij} P_{ij} (X_i - X_j) \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, N \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (4)$$

که  $F_j$  برابر با برآیند نیروهای وارد شونده بر  $j$  امین ذره است؛  $a$  شعاع ذره باردار است و  $ar_{ij}$  برابر است با:

$$ar_{ij} = \begin{cases} +1 & w.p. k_t \\ -1 & w.p. 1 - k_t \end{cases} \quad (5)$$

$K_t$  پارامتری برای کنترل اثر نوع نیرو است. موقعیت و سرعت جدید هر ذره با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$X_{j,new} = rand_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t + X_{j,old} \quad (6)$$

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t} \quad (7)$$

که در روابط بالا،  $k_a$  ضریب شتاب است؛  $k_v$  ضریب سرعت برای کنترل تأثیر سرعت قبلی است؛  $rand_{j1}$  و  $rand_{j2}$  دو عدد تصادفی هستند که به‌صورت یکنواخت در فاصله  $[0, 1]$  توزیع شده‌اند؛  $m_j$  جرم ذره  $j$  ام است که برابر است با  $q_j$  و  $\Delta t$  گام زمانی است و برابر یک در نظر گرفته می‌شود. برای ذخیره کردن تعدادی از بهترین ذرات تا تکرار کنونی، یک حافظه‌ای که دربردارنده بهترین ذرات و مقادیر تابع شایستگی‌شان است، می‌تواند بدون افزایش هزینه محاسباتی، باعث بهبود عملکرد الگوریتم شود. بدین منظور حافظه ذرات باردار (CM)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که متغیری از بردار حل، از مرزهای مجاز خود تجاوز کند، می‌تواند با استفاده از حافظه ذرات باردار و تکنیک موجود در الگوریتم جستجوی هارمونی، بازتولید شود:

$$x_{i,j} = \begin{cases} w.p.CMCR \Rightarrow \text{Select a new from CM} \\ \Rightarrow w.p.(1- PAR) \text{ do nothing} \\ \Rightarrow w.p.PAR \text{ choose a neighboring value} \\ w.p.(1-CMCR) \Rightarrow \text{Select a new value randomly} \end{cases} \quad (8)$$

که  $x_{i,j}$  برابر است با  $i$  امین متغیر در ذره  $j$ .  $CMCR$  برابر است با نرخ انتخاب یک مقدار برای بردار حل جدید از مقادیر ذخیره شده در حافظه ذرات و  $(1-CMCR)$  نرخ انتخاب تصادفی یک مقدار از میان مقادیر مجاز. همچنین  $PAR$  نرخ انتخاب مقدار جدید از میان همسایه‌های بهترین ذره باردار است و در محدوده  $0.1$  تا  $0.5$  انتخاب می‌شود (Kaveh and Talatahari, 2010). گام‌های زیر مراحل انجام این الگوریتم را نشان می‌دهد:

گام ۱: تعیین موقعیت و سرعت اولیه ذرات: مقدار اولیه ذرات به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود.

گام ۲: تعیین مقدار تابع شایستگی ذرات

گام ۳: ذخیره تعداد  $CM$  عدد از بهترین ذرات و مقدار تابع شایستگی‌شان

گام ۴: تعیین احتمال حرکت هر ذره به سمت ذرات دیگر و محاسبه بردار نیروی وارد بر ذره

گام ۵: حرکت هر ذره به سمت موقعیت جدید و محاسبه سرعت ذره

مخازن مورد بررسی به صورت رابطه زیر تعریف شده است (Seifollahi-Aghmiuni, 2015):

(۱۰)

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left( \frac{\text{Re}_{i,t} - \text{De}_{i,t}}{\text{De}_{\max i}} \right)^2 + \text{Penalty}_{i,t} : \text{for} \begin{cases} t = 1, \dots, T \\ i = 1, \dots, N \end{cases}$$

که در آن حجم رهاسازی از مخزن سد  $i$  ام در ماه  $t$  مقدار  $\text{De}_{i,t}$  نیاز پایین دست سد  $i$  ام در ماه  $t$   $\text{De}_{\max i}$  بیشترین نیاز سد  $i$  ام در طول دوره بهره برداری،  $T$  طول دوره بهره برداری،  $i$  شماره سد و  $\text{Penalty}_{i,t}$  مقدار جریمه ای که در صورت ارضا نشدن قید حجم مخزن در سد  $i$  ام در ماه  $t$ ، در تابع هدف اعمال می شود. محدودیت های سامانه مخازن مورد مطالعه در روابط (۱۱) تا (۱۶) ارائه شده است (Seifollahi-Aghmiuni, 2015). قید مربوط به حجم سرریز به صورت رابطه زیر اعمال می شود:

$$\text{Sp}_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} - S_{\max i} & : \text{if } S_{i,t} > S_{\max i} \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

رابطه پیوستگی: در تمامی مراحل بهینه سازی بهره برداری از مخزن بایستی موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} + \text{Re}_{i,t} - \text{Loss}_{i,t} - \text{Sp}_{i,t} \quad (12)$$

$$\text{Loss}_{i,t} = \bar{A} \times (\text{Ev}_{i,t} - \text{R}_{i,t}) \quad (13)$$

$$A_{i,t} = \sum_{j=0}^n b_j \times S_{i,t}^j \quad (14)$$

رابطه (۱۴) در واقع رابطه بین سطح و حجم هر مخزن در هر ماه  $t$  می باشد که حاصل از بهترین برازش بر روی داده های حجم-سطح می باشد. در این تحقیق مطابق با شکل ۳ بهترین برازش بدست آمده، یک معادله درجه ۲ بوده که ضریب همبستگی آن به ترتیب برای سدهای گلستان و وشمگیر برابر ۰/۹۸ و ۰/۹۹ بدست آمده است. قیود مرتبط با میزان رهاسازی و حجم ذخیره مخازن به شکل زیر تعریف شده اند:

$$S_{\min i} \leq S_{i,t} \leq S_{\max i} \quad (15)$$

$$\text{Re}_{\min i,t} \leq \text{Re}_{i,t} \leq \text{Re}_{\max i,t} \quad (16)$$

تابع جریمه به صورت زیر در مقدار تابع هدف اعمال شده است:

$$\text{Penalty} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_{\min i} - S_{i,t}}{S_{\min i}} \right)^2 & : \text{if } S_{i,t} < S_{\min i} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_{i,t} - S_{\max i}}{S_{\max i}} \right)^2 & : \text{if } S_{i,t} > S_{\max i} \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

گام ۶: در صورتی که هر ذره از فضای جستجوی مجاز تجاوز کند، موقعیت آن با استفاده از روش جستجوی هارمونی تصحیح می شود. گام ۷: اگر تعدادی از بردارهای جدید، از بدترین بردارهای درون حافظه ذرات بهتر بودند، این ذرات جدید، جایگزین ذرات بدتر می گردند. گام ۸: تکرار گام های ۴ تا ۷ الگوریتم تا اینکه معیار توقف ارضا شود.

در راستای بهبود عملکرد الگوریتم CSS در اکتشاف (Exploration) و به منظور جلوگیری از گیر افتادن در بهینه محلی، یک عملگر جهش مبتنی بر رتبه بندی ذرات اعمال شده است. استراتژی این الگوریتم بهبود یافته که از این پس با نام  $\text{CSS}_{\text{Mutate}}$  شناخته می شود، بدین صورت است که هر تکرار تعدادی از ذرات متناسب با مقدار تابع برازش شان انتخاب و عملگر جهش که در ادامه توضیح داده خواهد شد، بر روی آن ها اعمال می شود. در ابتدا، یک پارامتر احتمال تغییر با نام  $\text{cpp}$  با مقداری بین ۰ و ۱ تعریف می شود و بر اساس این پارامتر تصمیم گیری می شود که مؤلفه ای از ذره انتخابی برای عمل جهش، تغییر کند. بدین صورت که برای هر ذره انتخابی، پارامتر  $\text{cpp}$  با یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت مقایسه می شود. حال اگر پارامتر  $\text{cpp}$  بیشتر از مقدار تصادفی بود، یکی از مؤلفه های ذره انتخابی به صورت تصادفی انتخاب و مقدار آن با استفاده از رابطه زیر جایگزین می شود:

$$x_{ij} = x_{i,\min} + \text{random} \cdot (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (9)$$

که در آن  $x_{ij}$  در واقع  $i$  امین مؤلفه ذره انتخابی است. با توجه به اینکه این نوع جهش تعریف شده روی تعدادی از بهترین ذرات انتخاب شده اعمال می شود لذا فرض شده که امکان حرکت آن ها با یک جهش خفیف به سمت بهینه مطلق زیاد است؛ بنابراین برای اینکه ماهیت کلی ذره حفظ شود، عملگر جهش فقط بر روی یک بعد (مؤلفه) آن ذره اعمال می شود.

### ۳- مسأله بهینه سازی بهره برداری از سامانه مخازن

به منظور مدل سازی مسأله بهینه سازی بهره برداری از سامانه مخازن بایستی تابع هدف و قیودات مسأله تعریف شوند. معیار سنجش پاسخها مقایسه آن ها با نیاز پایین دست و بهترین مقدار برای ذخیره در ماه های مختلف سال است. رهاسازی از مخازن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخازن در هر دوره متغیر حالت می باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم جریان ورودی، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به صورت ماهانه است. تابع هدف بهینه سازی به صورت کمینه سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست محیطی، صنعت و غیره) در طول دوره آماری تعریف گردید. متغیرهای تصمیم، مقادیر خروجی ماهانه از مخازن سدها هستند که باید مقادیر بهینه آن ها تأمین گردد. تابع هدف سامانه

و پهنه حوضه از طول جغرافیایی ۵۴ درجه تا ۵۶ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و از عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی گسترده شده است. حوضه آبریز گرگان رود با متوسط بارندگی ۶۰۰ میلی‌متر در سال، دارای اقلیم معتدل خیزی است. با توجه به رشد اقتصادی و صنعتی منطقه در سال‌های اخیر و افزایش روزافزون جمعیت این استان، میزان تقاضای آب در این منطقه افزایش قابل توجهی داشته است. سدهای گلستان و وشمگیر بر روی رودخانه گرگان رود قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ نمایی از موقعیت حوضه آبریز گرگان رود بر گستره ایران به همراه موقعیت سدهای گلستان و وشمگیر نشان داده شده است (Golestan Regional Water Company, 2000).

سد خاکی وشمگیر، قدیمی‌ترین سد استان گلستان بوده که در سال ۱۳۴۹ با هدف توسعه و بهبود اراضی کشاورزی حاشیه گرگان رود و پایین‌دست، کنترل و مهار سیلاب منطقه و زهکشی اراضی به بهره‌برداری رسیده است. این سد در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و در عرض ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی در شمال شرقی شهر آق‌قلا و در فاصله ۴۲ کیلومتری این شهر و همچنین در فاصله ۶۲ کیلومتری شمال شرق گرگان در محلی به نام سنگرسوار بر روی رودخانه گرگان رود احداث گردیده است. فاصله سد وشمگیر تا ساحل دریای خزر ۷۰ کیلومتر و تا مرز بین ایران و ترکمنستان ۲۴ کیلومتر است. نیازهای پایین‌دست سد شامل نیاز کشاورزی، آبی‌پروری مخزن و شبکه و زیست‌محیطی است. حوضه آبریز این سد تا محل احداث در حدود ۷۱۵۶ کیلومترمربع وسعت دارد. سد مخزنی گلستان در بالادست سد وشمگیر و در محدوده دشت گرگان در حوالی روستای عرب سرنگ در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و طول ۵۵ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی در فاصله ۱۵ کیلومتری شمال شرقی گنبدکاووس واقع شده است. این سد روی شاخه اصلی گرگان رود احداث شده و رودخانه‌های اوغان، دوغ، تمر و حاجی‌قوشان و نیز شاخه کوچک آق‌سو به آن می‌ریزد. ساخت این سد در سال ۱۳۷۴ آغاز و در سال ۱۳۷۹ افتتاح شد، سد گلستان از نوع سدهای خاکی همگن است. مخزن سد در ابتدای ساخت حدود ۸۶ میلیون مترمکعب ظرفیت ذخیره داشته و حجم مخزن به هنگام سیلاب برابر ۱۳۵ میلیون مترمکعب طراحی شده است. به دلیل حجم رسوبات وارده به سد طی سال‌های اخیر به‌ویژه در سیل سال ۱۳۸۰، ظرفیت ذخیره سد به ۶۲ میلیون مترمکعب کاهش یافته و قابلیت تنظیم سالیانه آن ۱۱۵ میلیون مترمکعب است. نیازهای پایین‌دست سد شامل نیاز کشاورزی، صنعت، رهاسازی برای سد وشمگیر و زیست‌محیطی است. در جدول ۱ مشخصات سدهای گلستان و وشمگیر ارائه شده است (Golestan Regional Water Company, 2000; Yousefi, 1991).

که در روابط فوق  $SP_{i,t}$  مقدار آب سرریز شده از مخزن سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $S_{i,t}$  حجم مخزن سد  $i$  ام در ابتدای دوره  $t$ ،  $S_{i,t+1}$  حجم مخزن سد  $i$  ام در انتهای دوره  $t$ ،  $S_{maxi,t}$  حجم مخزن سد  $i$  ام در رقوم حداکثر،  $S_{mini}$  حداقل حجم مخزن سد  $i$  ام،  $I_{i,t}$  حجم آب ورودی به مخزن سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $LOSS_{i,t}$  میزان تلفات مخزن سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $EV_{i,t}$  ارتفاع تبخیر از دریاچه پشت سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $R_{i,t}$  ارتفاع بارش بر روی دریاچه پشت سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $A_{i,t}$  مساحت دریاچه پشت سد  $i$  ام در ماه  $t$ ،  $\bar{A}$  مساحت متوسط دریاچه پشت سد  $i$  ام در طول دوره  $t$ ،  $b_j$  ضرایب رابطه حجم-سطح مخزن سد  $i$  ام حاصل از بهترین برازش (در شکل ۳ ارائه شده‌اند)،  $Re_{mini,t}$  حداقل رهاسازی سد  $i$  ام در ماه  $t$  و  $Re_{maxi,t}$  حداکثر رهاسازی سد  $i$  ام در ماه  $t$  می‌باشند. شایان ذکر است با توجه به اینکه در ساختار الگوریتم بهینه‌سازی، متغیر تصمیم همان حجم رهاسازی‌ها از مخازن ( $Re_{i,t}$ ) می‌باشد، لذا عملاً قید مرتبط با میزان رهاسازی در درون ساختار خود الگوریتم رعایت شده و نیازی به اعمال تابع جریمه برای این قید در تابع هدف نمی‌باشد. بدین صورت که در گام اولیه الگوریتم (گام ۱) مقدار اولیه ذرات (همان متغیر تصمیم) به صورت تصادفی و با یک توزیع نرمال بین مقادیر حداقل و حداکثر ( $Re_{mini,t}$  و  $Re_{maxi,t}$ ) تعیین می‌شود. در ادامه در گام‌های بعدی روند اجرایی الگوریتم و بعد از به روز رسانی موقعیت جدید هر ذره، مطابق با گام ۶ الگوریتم، در صورتی که هر ذره از فضای جستجوی مجاز تجاوز کند (بین مقادیر حداقل و حداکثر میزان رهاسازی)، موقعیت آن با استفاده از روش جستجوی هارمونی (رابطه ۸) تصحیح و بازتولید می‌شود. بنابراین این قید به روش جستجوی هارمونی (به جای روش پنالتی) کنترل می‌گردد. همچنین با اعمال مساحت متوسط در طول دوره  $t$  ( $\bar{A}$ )، با توجه به مجهول بودن حجم مخزن در انتهای هر دوره ( $S_{i,t+1}$ )، در رابطه تلفات (رابطه ۱۳)، نهایتاً رابطه پیوستگی (رابطه ۱۲) تبدیل به یک رابطه غیر خطی می‌شود.

شکل ۱ فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی ذرات باردار جهش یافته ( $CSS_{Mutate}$ ) را در بهره‌برداری از سامانه مخازن نشان می‌دهد.

#### ۴- مطالعه موردی: مخازن حوضه آبریز گرگان رود

حوضه آبریز گرگان رود از شریان‌های اصلی شمال کشور و استان گلستان است که در شرق از کوه‌های واقع در استان خراسان شمالی آغاز شده و در غرب در مجاورت حوضه آبریز رودخانه قره‌سو به دریای خزر ختم می‌شود. این حوضه در شمال به حوضه آبریز رودخانه اترک که از حوضه‌های مرزی کشور به حساب می‌آید محدود و در جنوب به رشته‌کوه‌های البرز منتهی می‌شود. طول رودخانه اصلی گرگان رود از ابتدای تشکیل تا محل اتصال به دریا ۳۵۹/۴ کیلومتر برآورد شده است

آب مخزن سد در هر دوره زمانی به‌عنوان تابعی از حجم ذخیره در همان دوره در نظر گرفته می‌شود.

به‌منظور تحلیل و بررسی عملکرد هر سد، اطلاع از توپوگرافی دریاچه آن سد الزامی است. شکل ۳ نمودارهای سطح-حجم را برای سدهای گلستان و وشمگیر نشان می‌دهند. بر اساس این نمودارها سطح آزاد

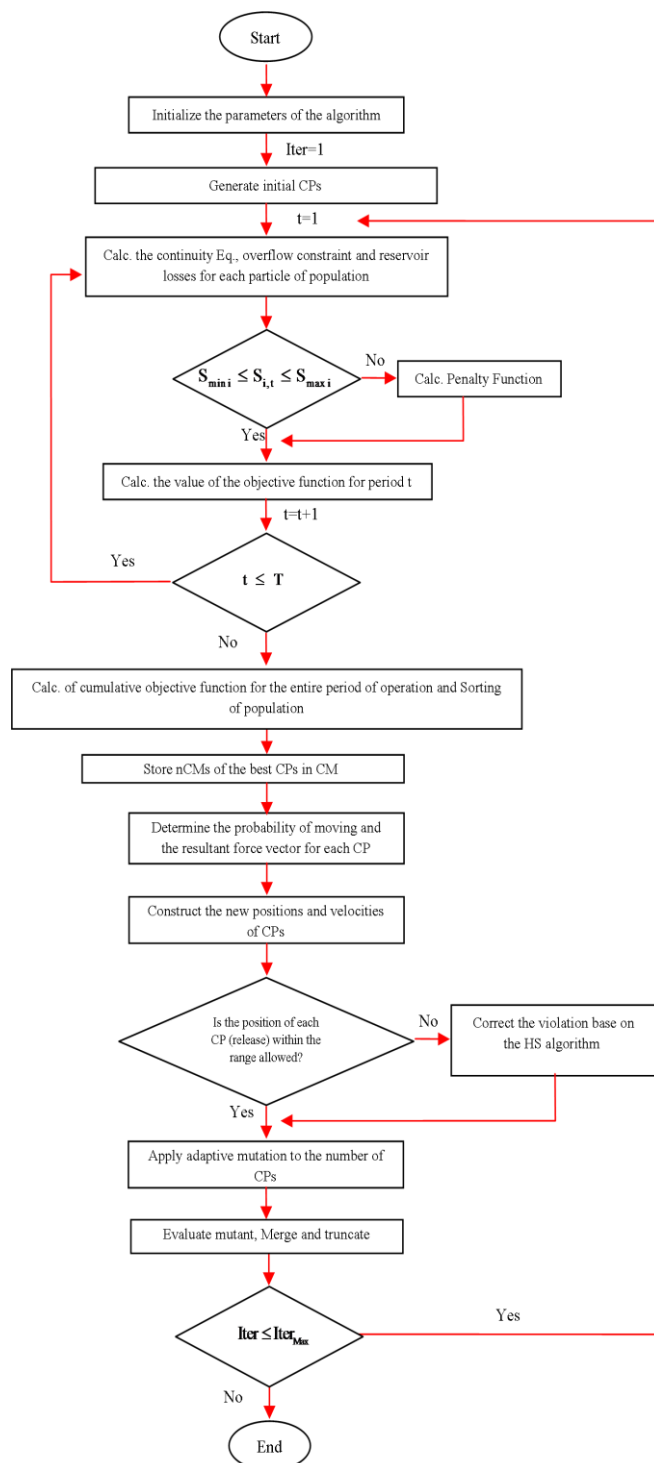


Fig. 1- Flowchart of CSSMutate used for multi-reservoir operation optimization

شکل ۱- فلوچارت الگوریتم CSSMutate جهت بهره‌برداری بهینه از سامانه مخازن

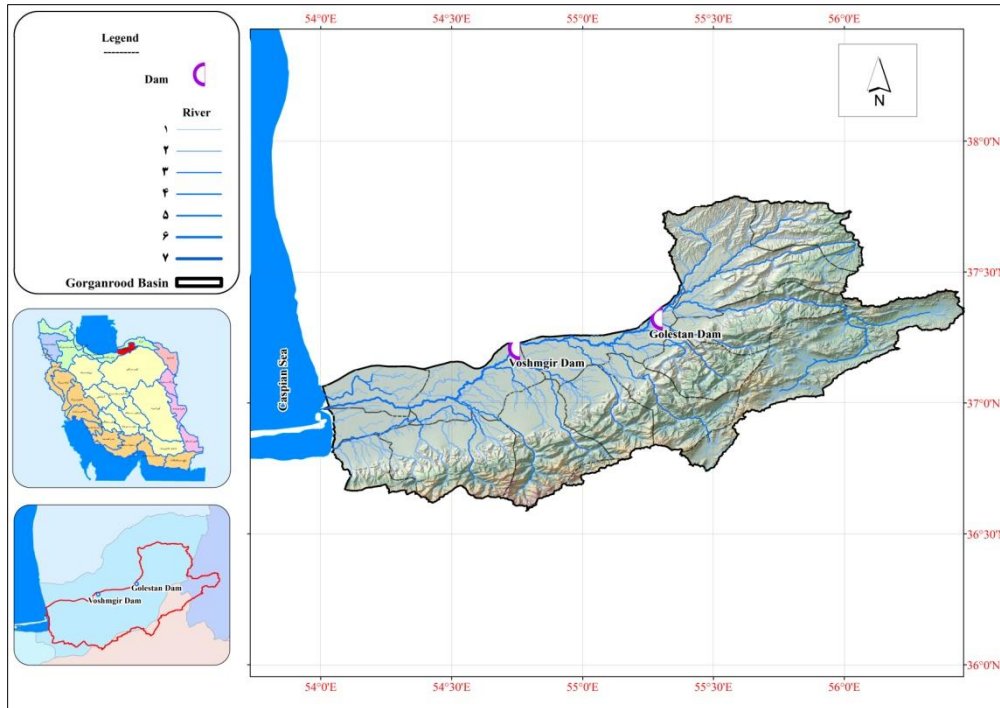


Fig. 2- Location of the Gorganrood basin (Golestan Regional Water Company, 2000)  
 شکل ۲- نقشه موقعیت حوضه آبریز گرانرود (Golestan Regional Water Company, 2000)

Table 1- Main characteristics of the Golestan- Voshmgir dams

جدول ۱- مشخصات عمومی سد های گلستان و وشمگیر

Characteristics	Golestan Dam	Voshmgir Dam
Type of dam	Earth dam	Earth dam
First year of operation	2000	1970
Height from foundation (m)	17	17.8
Crest length	1367	430
Total Storage capacity (MCM)	62	47
Irrigated land area (Km <sup>2</sup> )	100	210

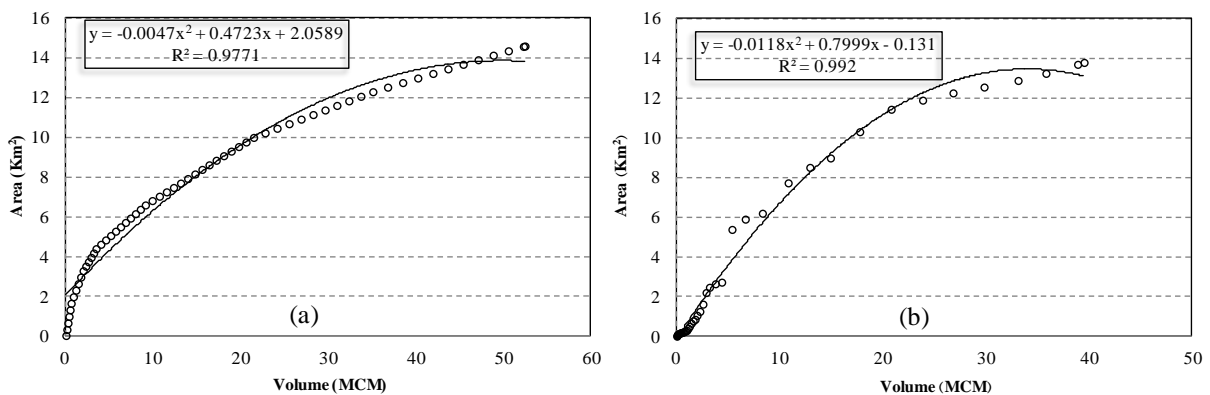


Fig. 3- Area- volume curve of (a) Golestan, (b) Voshmgir reservoir

شکل ۳- نمودار حجم- سطح مخزن سد (a) گلستان، (b) وشمگیر



## ۵- نتایج و تحلیل نتایج

### ۱-۱- صحت سنجی الگوریتم بهبود یافته

به منظور بررسی کارآمدی الگوریتم CSSMutate، از تعدادی توابع محک استاندارد ریاضی مختلف استفاده شده است. نتایج الگوریتم بهینه سازی بهبود یافته با الگوریتم استاندارد جستجوی ذرات باردار و همچنین تعدادی از الگوریتم های شناخته شده مقایسه شده است. در این بخش ابتدا یک آنالیز حساسیت بر روی میزان اعمال عملگر جهش انجام شد. بدین منظور دو تابع محک استاندارد ریاضی Ackley و Griewank برای دامنه مختلف تغییرات نرخ جهش حل شده است و نتایج حاصل از دو الگوریتم CSS و CSSMutate با یکدیگر مقایسه شده است. جدول ۲ مشخصات مربوط به این دو تابع محک استاندارد ریاضی را نشان می دهد. همچنین نمای سه بعدی این توابع در حالت ۲ متغیری در شکل ۴ نشان داده شده است. در این راستا دو معیار توقف زیر اعمال شد: ۱- رسیدن به بیشترین تعداد تکرار فرض شده، ۲- رسیدن به کمترین مقدار خطای فرض شده. در اینجا مقادیر خطا اختلاف بین جواب حاصل از اجرای الگوریتم و جواب مطلق تابع است. همچنین

بیشترین تعداد تکرار الگوریتم برای بررسی پارامتر جهش، برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. هر یک از الگوریتم ها ۵۰ بار مختلف با شرایط اولیه متفاوت اجرا شده اند. همان طور که قبلاً ذکر شد، عملگر جهش به منظور افزایش توان جستجوی سراسری و جلوگیری از به دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی، تعریف شده است. این عملگر را می توان توسط پارامتر درصد جهش (pm) کنترل و اعمال کرد.

جدول ۳ مقادیر میانگین و انحراف معیار خطا به ازای دامنه تغییرات پارامتر جهش برای اندازه جمعیت ۳۰ و بُعد مسأله ۱۰ برای دو تابع محک استاندارد را نشان می دهد. مطابق با نتایج جدول ۳ کلیه مقادیر بدست آمده برای هر دو تابع مورد بررسی با نرخ های متفاوت عملگر جهش در الگوریتم CSSMutate، در مقایسه با مقدار متناظر بدست آمده از نسخه اصلی بهبود یافته است که این نشان از تأثیر مثبت اعمال عملگر جهش در ساختار الگوریتم CSS می باشد. همچنین همان گونه که مشخص است بهترین نتایج به ازای اعمال عملگر جهش بر روی ۱۰٪ ذرات، به دست آمده است.

Table 2- Specifications of the benchmark problems

جدول ۲- مشخصات توابع محک استاندارد ریاضی

Function name	Function	Interval	Global Min
Griewank	$f(X) = 1 + \frac{1}{200} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$	$X \in [-600, 600]^n$	0.0
Ackley	$f(X) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)}\right) + 20 + e$	$X \in [-32.8, 32.8]^n$	0.0

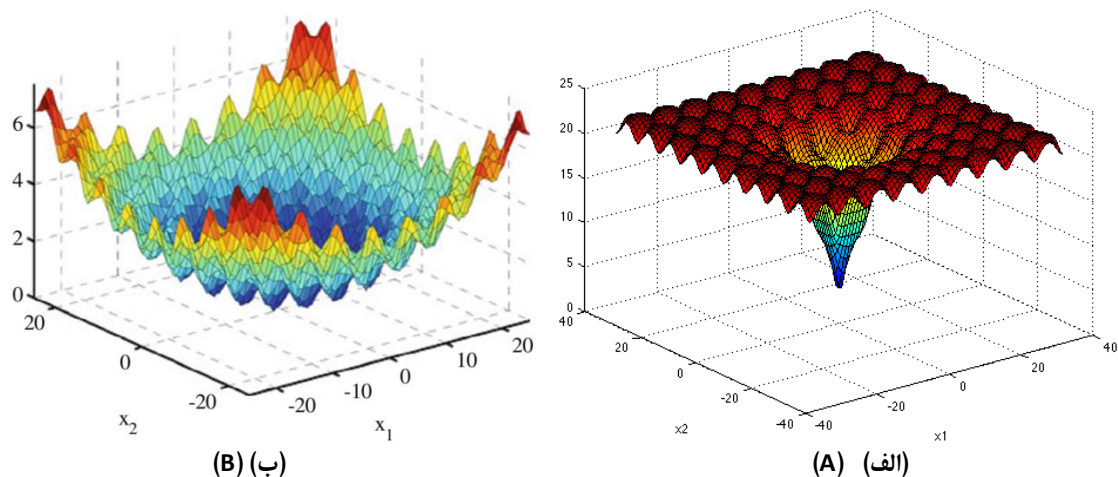


Fig. 4- A perspective view for function when  $n=2$ . A: Griewank, B: Ackley (Kaveh and Talatahari, 2010)

شکل ۴- نمای سه بعدی تابع زمانی که تعداد متغیرها برابر با ۲ ( $n=2$ ) است. الف: تابع Griewank، ب: تابع Ackley

(Kaveh and Talatahari, 2010)

**Table 3- Variation of mean and standard deviation ( $\pm$ SD) of error with variation of  $pm$**

جدول ۳- مقادیر میانگین و انحراف معیار خطا به ازای دامنه تغییرات پارامتر جهش

Function	Standard CSS	Mutation Percentage ( $pm$ )	CSS <sub>Mutate</sub>
Griewank	2.88E-3 (4.21E-2)	0.01	1.86E-4 (5.25E-4)
		0.05	1.52E-4 (4.58E-4)
		0.1	1.47E-4 (4.66E-4)
		0.15	3.31E-4 (1.00E-3)
Ackley	3.01E-3 (1.09E-2)	0.01	2.61E-13 (7.57E-13)
		0.05	4.44E-14 (2.21E-13)
		0.1	5.86E-15 (1.83E-15)
		0.15	6.22E-15 (1.87E-15)

مورد ارزیابی داشته است. ستون آخر جدول ۴ نشان‌دهنده نسبت کاهش معیار NFE بدست‌آمده از الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> در مقایسه با الگوریتم CSS است. بر این اساس به طور میانگین، معیار NFE حدود ۵۰٪ در الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با نسخه اصلی آن کاهش یافته است که در واقع نشان‌دهنده عملکرد بهتر و سریعتر در رسیدن به دقت تعریف شده می‌باشد.

#### ۵-۲- مسأله بهینه‌سازی سامانه‌های مرجع چهار و ده مخزنه

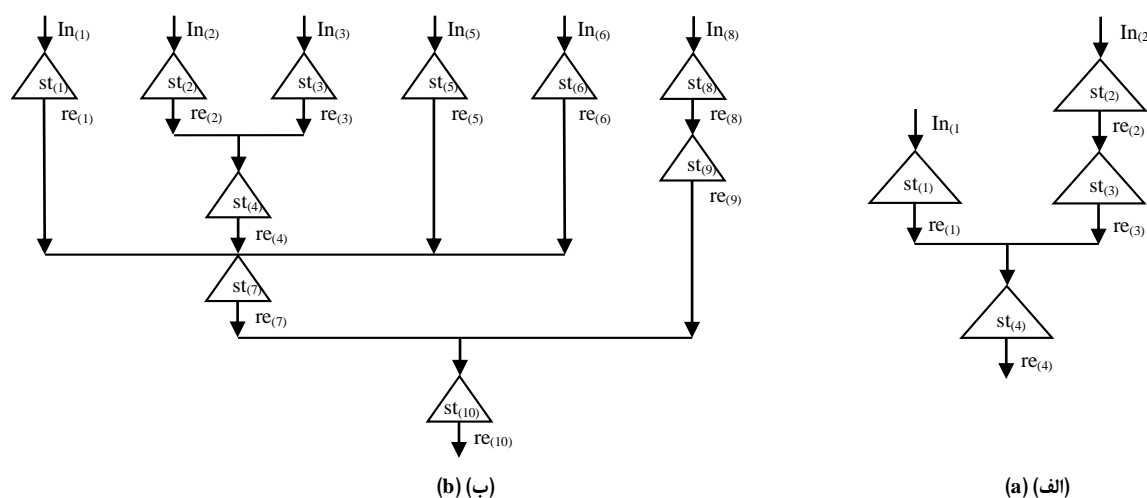
در اینجا به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم‌های استاندارد CSS و نسخه جهش یافته آن جهت حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن، دو مسأله مرجع سامانه چهار مخزنه و سامانه ده مخزنه مورد استفاده قرار گرفت. این مسائل فرصتی را جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مقابل جوابهای مطلق و یا جوابهای محلی بدست آمده توسط دیگر روشها فراهم می‌کند. مسأله سامانه چهارمخزنه برای اولین بار توسط Larson (1968) معرفی و حل شد. آب رهاسازی شده از کلیه مخازن به جز مخزن چهار، جهت تولید نیروی برق آبی استفاده شده و تنها خروجی مخزن چهار پس از عبور از نیروگاه به منظور تأمین نیاز کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مسأله سامانه ده مخزنه نیز برای اولین بار توسط Murray and Yakowitz (1979) معرفی و حل شد. آنها این مسأله را همانند سامانه چهارمخزنه بوسیله روش برنامه‌ریزی پویای مقید حل کردند. در این حالت خروجی مخازن بالادست به عنوان ورودی مخازن پایین دست بوده و یک مخزن ممکن است ورودی خود را از یک یا چند مخزن در بالادست دریافت کند. آب رهاسازی شده مخازن برای تولید نیروی برقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان سود حاصل از این سامانه‌ها توسط یک تابع خطی متناسب با خروجی مخزن تعریف شده است. این دو سامانه از تعدادی مخزن به صورت سری و موازی مطابق شکل ۵ تشکیل شده است.

متغیرهای تصمیم برای هر دو مسأله مرجع، آب رهاسازی شده در هر دوره بهره‌برداری می‌باشند.

در این بخش به منظور بررسی عملکرد الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub>، ۱۸ تابع محک استاندارد ریاضی حل شده است. Kaveh and Talatahari (2010) به منظور بررسی عملکرد الگوریتم جستجوی ذرات باردار از این توابع ریاضی استفاده کردند و نتایج حل آن‌ها را انواع الگوریتم‌های بهبودیافته ژنتیک مقایسه کردند. در اینجا به منظور انجام یک مقایسه منصفانه، مقدار اولیه پارامترهای مشترک دو الگوریتم استاندارد CSS<sub>Mutate</sub> و CSS مانند اندازه ذرات باردار، اندازه حافظه باردار و بیشترین تعداد تکرار الگوریتم‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین جمعیت اولیه تولید شده در هر بار اجرای هر دو الگوریتم یکسان لحاظ شده است. میزان احتمال جهش نیز برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است و در واقع عملکرد جهش بر ۱۰٪ از کل ذرات اعمال خواهد شد. نتایج این مقایسه در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در این جدول نشان‌دهنده مقدار میانگین تعداد تحلیل تابع (NFE) در ۵۰ بار اجرای مستقل هر یک از الگوریتم‌ها است. این مقدار یکی از معیارهای متداول برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های مختلف است بطوریکه هرچه قدر که این مقدار کمتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم موردنظر است. مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده نسبت اجرای ناموفق به اجرای موفق هر الگوریتم است؛ بنابراین عدم وجود عدد داخل پرانتز به این معنی است که الگوریتم در تمام ۵۰ بار اجرای مستقل خود موفق عمل کرده است. اجرای یک الگوریتم زمانی موفقیت‌آمیز تلقی می‌شود که جواب نهایی به‌دست‌آمده با یک دقت از پیش تعیین شده، نزدیک به جواب بهینه مطلق باشد؛ که در اینجا این دقت برابر با  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است که همان معیار توقف اجرای الگوریتم است ( $\epsilon = |f_{min} - f_{final}| = 10^{-4}$ )؛ بنابراین در صورتی که اختلاف بین مقدار جواب حاصل از اجرای الگوریتم با جواب بهینه مطلق مساوی یا کمتر از  $10^{-4}$  شود، به معنای موفقیت آن الگوریتم در آن اجرا بوده و تعداد تحلیل تابع تا به این لحظه را به‌عنوان خروجی الگوریتم گزارش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده برتری الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> را در مقایسه با الگوریتم استاندارد جستجوی ذرات باردار و همچنین الگوریتم‌های بهبودیافته ژنتیک نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۴ مشخص است، الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> بهترین عملکرد را در ۱۷ تابع از ۱۸ تابع

**Table 4- Performance comparison for the benchmark problems**  
**جدول ۴- نتایج عملکرد الگوریتم‌های مختلف در حل توابع محک استاندارد ریاضی**

Function	GEN	GEN-S	GEN-S-M	GEN-S-M-LS	CSS	CSS <sub>Mutate</sub>	NFE reduction ratio (%)
AP	1,360 (0.99)	1,360	1,277	1,253	804	330	59.0
Bf1	3,992	3,356	1,640	1,615	1,187	615	48.2
Bf2	20,234	3,373	1,676	1,636	742	569	23.3
BL	19,596	2,412	2,439	1,436	423	67	84.2
Branin	1,442	1,418	1,404	1,257	852	479	43.8
Camel	1,358	1,358	1,336	1,300	575	371	35.5
Cb3	9,771	2,045	1,163	1,118	436	303	30.5
CM	2,105	2,105	1,743	1,539	1,563	474	69.7
DeJong	9,900	3,040	1,462	1,281	630	371	41.1
Exp2	938	936	817	807	132	139	-
Exp4	3,237	3,237	2,054	1,496	867	267	69.2
Exp8	3,237	3,237	2,054	1,496	1,426	594	58.3
GP	1,478	1,478	1,408	1,325	682	438	35.8
Griewank	18,838 (0.91)	3,111 (0.91)	1,764	1,652 (0.99)	1,551	550	64.5
Hartman 3	1,350	1,350	1,332	1,274	860	467	45.7
Hartman 6	2,562 (0.54)	2,562 (0.54)	2,530 (0.67)	1,865 (0.68)	1,783	705	60.5
Rastrigin	1,533 (0.97)	1,523 (0.97)	1,392	1,381	1,402	686	51.1
Rosenbrock	9,380	3,739	1,675	1,462	1,452	1,209	16.7
Total	112,311 (96.7)	41,640 (96.7)	29,166 (98.16)	25,193 (98.16)	17,367	8,634	50.3



**Fig. 5- Schematic representation of the (a) four-reservoir and (b) ten-reservoir problem (Murray and Yakowitz, 1979)**

شکل ۵- نمای کلی از الف: سامانه چهار مخزنه، ب: سامانه ده مخزنه (Murray and Yakowitz, 1979)

کلیه قیودات و پارامترهای ثابت این دو مسأله مرجع در تحقیق Murray and Yakowitz (1979) معرفی شده‌اند.

در این تحقیق ابتدا جواب بهینه مطلق دو مسأله مرجع سامانه مخازن فرضی با روش برنامه‌ریزی خطی توسط نرم‌افزار Lingo 17.0 بدست آمد تا معیاری برای سنجش عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن باشد. سپس تابع هدف با استفاده از شش الگوریتم فراکاوشی (GA, PSO, DE, CSS<sub>Mutate</sub> و CSS<sub>HS</sub>) بهینه‌سازی شد. نتایج حاصل از LP به ترتیب مقادیر ۳۰۸/۲۹ و ۱۱۹۴/۴۴ را به عنوان جواب بهینه تابع هدف

هدف از این مسائل بهره‌برداری سیستم جهت حداکثر سازی سود حاصل در ۱۲ دوره ۲ ساعته (یک شبانه روز) می‌باشد. تابع هدف به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Maximize } F = \sum_{nd=1}^{ND} \sum_{t=1}^T b_{(nd)}(t) \times re_{(nd)}(t) \quad (18)$$

که در رابطه فوق،  $nd$  شمارنده تعداد مخازن؛  $ND$  تعداد کل مخازن؛  $t$  شمارنده دوره بهره‌برداری؛  $T$  کل دوره بهره‌برداری؛  $b_{(nd)}(t)$  مقادیر ضرب فایده سد  $nd$  ام در دوره زمانی بهره‌برداری  $t$  ام و  $re_{(nd)}(t)$  آب رهاسازی شده از مخزن  $nd$  ام در دوره زمانی بهره‌برداری  $t$  ام می‌باشند.

در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از برتری نسبی الگوریتم استاندارد CSS و نسخه جهش یافته آن می‌باشد. همانگونه که مشخص است، الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها جوابهای نزدیکتری به جواب بهینه مطلق (حاصل از LP) بدست آورده است. بهترین جواب حاصل از CSS<sub>Mutate</sub> برابر با ۳۰۸/۲۹ است که برابر با مقدار بهینه مطلق است. همچنین میانگین جوابهای بدست آمده از ۱۰ بار اجرای الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> در حدود ۰/۱۵٪ اختلاف را با مقدار بهینه مطلق نشان می‌دهد. به علاوه، بدترین جواب بدست آمده حاصل از الگوریتم استاندارد CSS و CSS<sub>Mutate</sub> بهتر از میانگین جوابهای بدست آمده حاصل از ۱۰ بار اجرای دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی مورد مقایسه می‌باشد. همچنین مقادیر انحراف معیار استاندارد و ضریب تغییرات حاصل از الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> به طور معناداری از دیگر الگوریتم‌ها کمتر می‌باشد. بنابراین به طور کلی نتایج حاکی از دقت و توانایی بالای الگوریتم CSS<sub>Mutate</sub> در رسیدن به جواب بهینه مطلق مسأله مرجع سامانه چهار مخزنه می‌باشد.

برای سامانه چهار و ده مخزنه تولید کرد. این مقادیر بدست آمده با نتایج حاصل از پژوهش (Bozorg Haddad et al. (2011 یکسان می‌باشد. مقادیر پارامترهای ثابت الگوریتم‌های مختلف با انجام یک آنالیز حساسیت تعیین شده است. به این صورت که بازه‌ای از پارامترها در نظر گرفته شد و هر الگوریتم چندین بار اجرا شد. هر بار ترکیبی از مقادیر پارامترهای مختلف در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از اجراهای مختلف مقایسه و بهترین مقادیر برای پارامترهای ثابت هر الگوریتم انتخاب شد. این مقادیر برای الگوریتم‌های مختلف به صورت جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های CSS و CSS<sub>Mutate</sub> در این تحقیق، مسأله مرجع سامانه چهار مخزنه با تعداد ۵۰۰،۰۰۰ به ازای بیشترین تعداد تحلیل تابع هدف (NFE) به عنوان معیار توقف الگوریتم‌ها حل شده و با نتایج چهار الگوریتم فراکاوشی دیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل هر یک از الگوریتم‌ها

**Table 5- Parameter settings used in four- and ten-reservoir problems**  
جدول ۵- مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسائل مرجع سامانه مخازن

Algorithm	Parameter	Value
GA	Mutation rate	0.06
	Mutation function	Uniform
	Selection function	Roulette wheel
	Crossover function	Single point crossover
	Crossover probability	0.70
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir
PSO	Inertia weight ( $w$ )	0.9
	Personal learning coefficient ( $C_1$ )	2
	Global learning coefficient ( $C_2$ )	2
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir
DE	Lower bound of scaling factor	0.2
	Upper bound of scaling factor	0.8
	Crossover probability	0.1
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir
HS	Number of new harmonies	100
	HMCR	0.95
	PAR	0.15
	Fret Width Damp Ratio	0.99
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir
CSS	$a$	0.01
	CMCR	0.85
	PAR	0.1
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir
CSS <sub>Mutate</sub>	$a$	0.01
	$c_{pp}$	0.8
	$pm$	0.1
	Number of populations	Four-Reservoir Ten-Reservoir

**Table 6- Results for 10 different runs in four- reservoir problem**

جدول ۶- نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل الگوریتم‌ها در حل مسئله مرجع سامانه چهار مخزنه						
No. of run	GA	PSO	DE	HS	CSS	CSSMutate
1	298.83	303.41	283.19	273.3	307.65	307.98
2	299.43	306.00	274.36	272.61	307.35	307.70
3	301.06	303.34	276.86	275.73	306.63	307.97
4	298.51	302.00	280.96	273.97	307.81	308.13
5	300.26	306.42	277.59	271.16	306.36	307.69
6	299.76	303.32	280.45	276.93	307.54	307.86
7	298.71	302.73	273.67	272.41	306.69	306.99
8	300.57	306.61	278.34	273.28	307.81	308.15
9	298.51	306.45	278.66	272.04	307.97	308.29
10	300.68	303.40	280.15	274.52	307.24	307.58
Best	301.06	306.61	283.19	276.93	307.97	308.29
Worst	298.51	302.00	273.67	271.16	306.36	306.99
Average	299.63	304.37	278.42	273.60	307.31	307.83
Standard Deviation	0.9707	1.78	2.96	1.7507	0.5619	0.3744
Coefficient of Variation	0.0032	0.0058	0.0106	0.0064	0.0018	0.0012

البته بعد از آن الگوریتم استاندارد CSS عملکرد بهتری را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها با بدست آوردن مقادیر  $307/97$ ،  $307/31$  و  $306/36$  به ترتیب به عنوان بهترین، میانگین و بدترین جواب، از خود نشان داده است.

جدول ۹ نتایج تحقیقات پیشین انجام شده جهت حل مسأله مرجع سامانه ده‌مخزنه را با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاشی نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۹ نشان داده شده است، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، مسئله مرجع ده‌مخزنه را با کمترین تعداد تحلیل تابع هدف (NFE) در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها حل کرده است. مطابق با نتایج بدست آمده، بالاترین درصد نزدیکی جواب بهینه با جواب بهینه مطلق تابع هدف برابر با  $99/95\%$  بوده که مربوط به تحقیقات Ehteram et al. (2017) می‌باشد. در پایان ذکر این نکته ضروری است که نتایج حاصل از الگوریتم‌های CSS و CSSMutate با ۲۰ و ۲۵ ذره باردار به عنوان اندازه جمعیت به ترتیب در حل مسائل مرجع سامانه چهار و ده مخزنه بدست آمده است که این مقادیر به میزان  $0/1$  اندازه جمعیت دیگر الگوریتم‌ها می‌باشد. این کاهش در تعداد ذرات باعث افزایش سرعت همگرایی و کاهش هزینه‌های محاسباتی الگوریتم می‌شود.

اخیراً محققین زیادی مسأله مرجع سامانه چهارمخزنه را با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراکاشی حل کردند. جدول ۷ نتایج حاصل از تعدادی از این تحقیقات را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است الگوریتم جستجوی گرانشی<sup>۲۳</sup> (GSA) که توسط Bozorg-Hadad et al. (2016) مورد استفاده قرار گرفته، به نزدیکترین جواب به مقدار بهینه مطلق بدست آمده از LP در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های فراکاشی دست یافته است. همچنین الگوریتم ترکیبی ژنتیک و میگو<sup>۲۴</sup> (Hybrid) که توسط Ehteram et al. (2017) معرفی شد، مسأله مرجع چهارمخزنه را با کمترین تعداد تحلیل تابع هدف (NFE) در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها حل کرده است و مقدار  $308/17$  را به عنوان جواب میانگین نهایی گزارش کرده است که به میزان  $99/96\%$  به جواب بهینه مطلق نزدیک می‌باشد.

در ادامه به منظور حل مسأله مرجع سامانه ده مخزنه، هر الگوریتم به تعداد ۱۰ بار به صورت مستقل اجرا شد و بیشترین تعداد تحلیل تابع هدف (NFE) به عنوان معیار توقف برابر با  $1,250,000$  در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۸ ارائه شده است. خطای نسبی مربوط به مقدار میانگین بدست آمده برای تابع هدف حاصل از ۱۰ بار اجرای الگوریتم GA, PSO, DE, HS, CSS و CSSMutate در مقایسه با جواب بهینه مطلق (حاصل از LP) به ترتیب برابر با  $1/93\%$ ،  $1/25\%$ ،  $5/96\%$ ،  $6/10\%$  و  $0/26\%$  می‌باشد. بهترین، میانگین و بدترین مقدار تابع هدف بدست آمده حاصل از ۱۰ بار اجرای الگوریتم

### ۵-۳- بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای گلستان و وشمگیر

پس از بررسی توانایی و عملکرد الگوریتم بهبودیافته در حل مسائل بهینه‌سازی، در این قسمت به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای گلستان و وشمگیر پرداخته شده است. بر اساس اطلاعات در دسترس، افق برنامه‌ریزی برای سامانه دو مخزنه مورد بررسی ۵ سال (۶۰ ماه) در نظر گرفته شده است که از سال آبی ۸۷-۸۶ تا ۹۱-۹۰ است؛ بنابراین الگوریتم‌های مورد بررسی در سامانه دو مخزنه دارای ۱۲۰ بُد می‌باشند.

**Table 7- Results of previous studies in four- reservoir problem**

جدول ۷- نتایج تحقیقات پیشین در حل مسأله مرجع سامانه چهار مخزنه

Study	Algorithm	Ave	SD	Npop	MNFE	MaxIt
Bozorg-Hadad et al.	HBMO (2011)	307.50	0.417	220	1,100,000	-
	BA (2014)	307.84	0.350	50	500,050	-
	WCA (2014)	304.92	1.887	100	-	5,000
	BBO (2015)	307.69	0.511	-	500,000	-
	GSA (2016)	308.30	0.277	200	500,000	-
	GA (2016)	299.60	0.705	200	500,000	-
Hosseini-Moghari et al. (2015)	GA	301.54	-	50	-	20,000
	ICA	305.11	-	50	-	20,000
	COA	306.90	-	50	-	20,000
Asgari et al. (2015)	GA	299.69	0.689	200	-	8,000
	WOA	307.75	0.364	-	-	20,000
Ahmadianfar et al. (2015)	IBA	308.05	0.150	300	-	780
Garousi-Nejad et al. (2016)	FA	305.51	0.665	50	500,050	-
	MFA	308.21	0.050	50	500,050	-
Solgi et al. (2016)	EHBMO	308.08	0.321	211	-	4,000
Ehteram et al. (2017)	GA	306.72	0.580	-	50,000	-
	Krill	307.26	0.220	-	50,000	-
	Hybrid	308.17	0.050	-	50,000	-

**Table 8- Results for 10 different runs in ten- reservoir problem**

جدول ۸- نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل الگوریتم‌ها در حل مسأله مرجع سامانه ده مخزنه

No. of run	GA	PSO	DE	HS	CSS	CSS <sub>Mutate</sub>
1	1178.32	1178.85	1131.57	1129.43	1187.11	1193.88
2	1164.07	1177.74	1126.72	1125.65	1186.86	1188.79
3	1181.62	1173.60	1138.41	1129.22	1188.90	1191.08
4	1172.41	1181.47	1120.18	1109.56	1186.06	1190.20
5	1162.73	1180.83	1107.93	1120.74	1186.46	1194.23
6	1170.88	1171.02	1133.56	1123.94	1189.55	1192.58
7	1169.53	1183.81	1123.87	1132.41	1184.89	1189.71
8	1169.00	1179.02	1125.02	1130.34	1185.01	1191.85
9	1167.78	1184.11	1112.30	1105.58	1190.25	1189.97
10	1177.87	1184.87	1113.49	1108.45	1187.48	1190.58
Best	1162.73	1171.02	1107.93	1105.58	1184.89	1188.79
Worst	1181.62	1184.87	1138.41	1132.41	1190.25	1194.23
Average	1171.42	1179.53	1123.30	1121.53	1187.26	1191.29
Standard Deviation	6.2079	4.5296	9.8891	10.0542	1.8219	1.8125
Coefficient of Variation	0.0053	0.0038	0.0088	0.0090	0.0015	0.0015

**Table 9- Results of previous studies in ten- reservoir problem**

جدول ۹- نتایج تحقیقات پیشین در حل مسأله مرجع سامانه ده مخزنه

Study	Algorithm	Ave	SD	Npop	MNFE	MaxIt
Wardlaw and Sharif (1999)	GA	1190.25	-	500	-	2500
Jalali et al. (2007)	ACO	1185.22	3.60	150	-	3,000
Bozorg-Hadad et al. (2011)	HBMO	1148.05	5.00	220	1,320,000	-
Ehteram et al. (2017)	GA	1188.68	1.13	-	500,000	-
	Krill	1189.66	0.707	-	500,000	-
	Hybrid	1193.91	0.31	-	500,000	-
Ahmadianfar et al. (2015)	IBA	1192.89	0.69	100	-	9700
Garousi-Nejad et al. (2016)	FA	1097.41	8.0142	50	1,000,000	-
	MFA	1183.59	1.5177	50	1,000,000	-

۰/۲۲ به دست آمد که نشان از قابلیت بالای این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگر است.

**Table 10- Parameter settings used in Golestan-Voshmgir reservoir operation optimization problems**

جدول ۱۰- مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سدهای گلستان و وشمگیر

Algorithm	Parameter	Value
GA	Mutation rate	0.05
	Mutation function	Uniform
	Selection function	Roulette wheel
	Crossover function	Single point crossover
	Crossover probability	0.80
PSO	Inertia weight ( $w$ )	0.9
	Personal learning coefficient ( $C_1$ )	2
	Global learning coefficient ( $C_2$ )	2
	Lower bound of scaling factor	0.2
DE	Upper bound of scaling factor	0.8
	Crossover probability	0.2
HS	Number of new harmonies	$N_{pop}/2$
	HMCR	0.95
	PAR	0.1
	Fret Width Damp Ratio	0.99
CSS	$a$	1
	CMCR	0.85
	PAR	0.15
CSSMutate	$a$	1
	$cpp$	0.8
	$pm$	0.1

الگوریتم CSSMutate به ترتیب با تأمین ۹۴/۶۳ و ۹۵/۳۰ درصد از نیازهای کل پایین دست سدهای گلستان و وشمگیر و شاخص‌های عملکرد مناسب نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی کاربرد مناسب این الگوریتم در مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم

به‌منظور حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم مخازن، با تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای هر یک از الگوریتم‌های فراکاوشی (GA, PSO, DE, HS, CSS, CSSMutate) بهترین مقدار برای آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. جهت همسنگ شدن و مقایسه بهتر الگوریتم‌های مورد بررسی با یکدیگر تعداد تکرار در تمامی الگوریتم‌ها یکسان و برابر ۱۰۰۰ و همچنین تعداد جمعیت پس از انجام یک آنالیز حساسیت در بازه ۵۰ تا ۳۵۰ برابر ۱۵۰ در نظر گرفته شده است. این مقادیر برای الگوریتم‌های مختلف به صورت جدول ۱۰ در نظر گرفته شده است. تمامی الگوریتم‌های فراکاوشی مورد استفاده، در محیط نرم‌افزار متلب (MATLAB R2014a) کد نویسی شده و در رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7-M 620, 2.67 GHz and 4 GB RAM اجرا شده‌اند.

در این قسمت نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل هر یک الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن سدهای گلستان و وشمگیر با تابع هدف حداقل کردن کمبود کل برای حالت بلندمدت ۶۰ ماهه در جدول ۱۱ ارائه شده است. در این جدول مقادیر بهترین، بدترین، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییر مرتبط با نتایج بدست آمده از ۱۰ بار اجرا ارائه شده است. بر این اساس مقادیر میانگین تابع هدف برابر ۱/۱۸، ۰/۶۸، ۰/۵۷، ۰/۹۱، ۰/۳۸ و ۰/۲۸ به ترتیب برای الگوریتم‌های GA, PSO, DE, HS, CSS, CSSMutate بدست آمده است. همچنین مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییر برای الگوریتم CSS و نسخه بهبود یافته آن به شکل معناداری کمتر از سایر الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشند. در ادامه نتایج بهترین مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اعتمادپذیری حجمی و زمانی، آسیب‌پذیری و پایداری، حاصل از اجرای الگوریتم‌های مورد بررسی بر روی تابع هدف برای ۱۰۰۰ تکرار به همراه زمان اجرای هر یک از الگوریتم‌ها در جدول ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف در الگوریتم CSSMutate برابر

آمده میزان خروجی حاصل از اجرای الگوریتم‌های GA, PSO, DE, HS, CSS و CSSMutate برای سد گلستان به ترتیب نشان دهنده تأمین ۸۶/۶۸، ۸۷/۸۶، ۹۲/۱۳، ۸۹/۰۲، ۹۲/۳۴ و ۹۴/۶۳ درصد از نیاز کل پایین دست در طول دوره و برای سد وشمگیر به ترتیب نشان دهنده تأمین ۸۶/۸۴، ۹۳/۵۲، ۸۹/۹۸، ۸۶/۹۴، ۹۲/۸۵ و ۹۵/۳۰ درصد از نیاز کل پایین دست در طول دوره می‌باشد. همچنین، میزان حجم کل کمبودها بر حسب میلیون متر مکعب برای سد گلستان بر اساس نتایج الگوریتم‌های شش گانه مورد بررسی به ترتیب برابر ۸۲/۳۲، ۷۵/۰۶، ۴۸/۶۳، ۶۷/۸۸، ۳۵/۲۰ و ۳۳/۲۰ در طول دوره و برای سد وشمگیر به ترتیب برابر ۷۶/۹۴، ۳۷/۸۹، ۵۸/۵۷، ۷۶/۳۷، ۳۲/۲۹ و ۲۷/۵۰ میلیون مترمکعب در طول دوره می‌باشد.

نمودار همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در اجرای مدل بهره‌برداری از سیستم مخازن سدهای گلستان و وشمگیر در شکل ۶ آورده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است الگوریتم CSS و نسخه پیشنهادی آن علاوه بر دستیابی به بهترین جواب، دارای سرعت همگرایی مناسبی نیز می‌باشند به طوری که پس از سپری شدن حدود ۱۰۰ تکرار از اجراء این دو الگوریتم به جواب‌های قابل قبولی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد بررسی دست یافته‌اند.

مخازن را به خوبی نشان می‌دهد. شاخص اعتمادپذیری زمانی، در حالتی که ۹۰٪ نیازهای پایین دست توسط مخزن تأمین شود ( $\alpha=0.9$ ) محاسبه شده است. بر این اساس بیشترین درصد دوره‌هایی که مخزن ۹۰٪ نیازهای پایین دست را تأمین کرده و با شکست روبرو نشده نیز توسط الگوریتم CSSMutate حاصل شده و به میزان ۶۱/۶۷ و ۷۰٪ به ترتیب برای سدهای گلستان و وشمگیر حاصل شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مقدار معیار آسیب‌پذیری برای مخزن وشمگیر که از الگوریتم DE بدست آمده برابر با یک می‌باشد که این بدین معناست که دوره‌ای در طول شبیه‌سازی وجود دارد که طی آن تقریباً هیچ تخصیصی صورت نگرفته است. ستون آخر جدول ۱۲ مربوط به تعیین معیار پایداری بوده که در واقع ترکیبی از معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری می‌باشد. بر اساس معیار پایداری بهترین عملکرد برای سد گلستان، مربوط به الگوریتم‌های DE و CSSMutate و به میزان ۰/۲۲ و برای سد وشمگیر، به میزان ۰/۲۸ مربوط به الگوریتم CSSMutate می‌باشد. کمترین زمان اجرای الگوریتم‌ها مربوط به الگوریتم PSO و سپس الگوریتم جستجوی ذرات باردار و نسخه بهبودیافته آن می‌باشد. با توجه به اینکه عملکرد چشم به حجم محاسبات الگوریتم پیشنهادی اضافه می‌کند لذا زمان اجرا نسبت به الگوریتم استاندارد اندکی افزایش یافته است. مطابق با نتایج بدست

**Table 11- Results for 10 different runs in Gorganrood basin multi-reservoir problem**

جدول ۱۱- نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل الگوریتم‌ها در حل مسأله بهینه‌سازی مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود

No. of run	GA	PSO	DE	HS	CSS	CSSMutate
1	1.24	0.51	0.56	0.94	0.51	0.28
2	1.06	0.64	0.5	0.79	0.43	0.22
3	1.13	0.65	0.54	0.85	0.35	0.32
4	0.78	0.84	0.49	0.98	0.33	0.34
5	1.01	0.71	0.52	1.09	0.41	0.26
6	1.54	0.55	0.68	0.84	0.38	0.24
7	0.81	0.67	0.72	0.78	0.32	0.24
8	1.24	0.78	0.51	1.12	0.36	0.27
9	1.66	0.86	0.61	0.81	0.32	0.34
10	1.33	0.63	0.59	0.93	0.35	0.29
Best	0.78	0.51	0.49	0.78	0.32	0.22
Worst	1.66	0.86	0.72	1.12	0.51	0.34
Average	1.18	0.68	0.57	0.91	0.38	0.28
Standard Deviation	0.2853	0.1153	0.0781	0.1213	0.0597	0.0424
Coefficient of Variation	0.2418	0.1686	0.1366	0.1329	0.1587	0.1515

**Table 12- Optimal value and reservoir performance criteria obtained by proposed algorithms**

جدول ۱۲- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخازن حوضه گرگان‌رود حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

Algorithm	Optimal value	CPU Runtime (s)	Golestan deficit (MCM)	Voshmgir deficit (MCM)	Golestan Reliability		Voshmgir Reliability		Vulnerability		Sustaibility	
					Volumetric	Time ( $\alpha=0.9$ )	Volumetric	Time ( $\alpha=0.9$ )	Golestan	Voshmgir	Golestan	Voshmgir
GA	0.78	175.1	82.32	76.94	86.68	26.67	86.84	35	0.56	0.60	0.05	0.07
PSO	0.51	110.3	75.06	37.89	87.86	36.67	93.52	61.67	0.52	0.83	0.08	0.19
DE	0.49	139.5	48.63	58.57	92.13	51.67	89.98	61.67	0.36	1	0.22	0.17
HS	0.78	166.6	67.88	76.37	89.02	45	86.94	36.67	0.67	0.98	0.14	0.07
CSS	0.32	121.9	35.20	32.29	92.34	58.33	92.85	60	0.53	0.95	0.20	0.24
CSSMutate	0.22	130.2	33.20	27.50	94.63	61.67	95.30	70	0.42	0.82	0.22	0.28



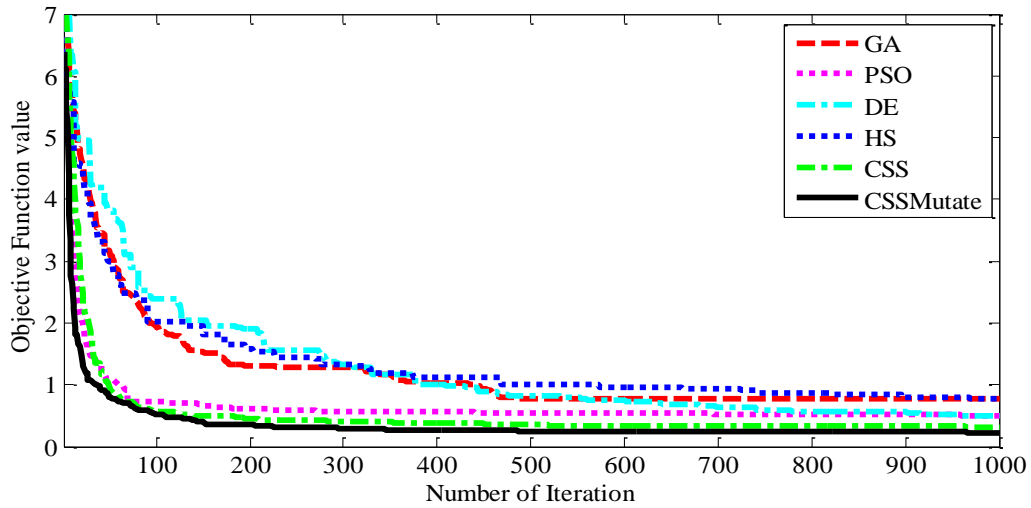


Fig. 6- Objective value evaluation of Golestan- Voshmgr reservoir system operation by proposed algorithms

شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری از سیستم مخازن گلستان و وشمگیر

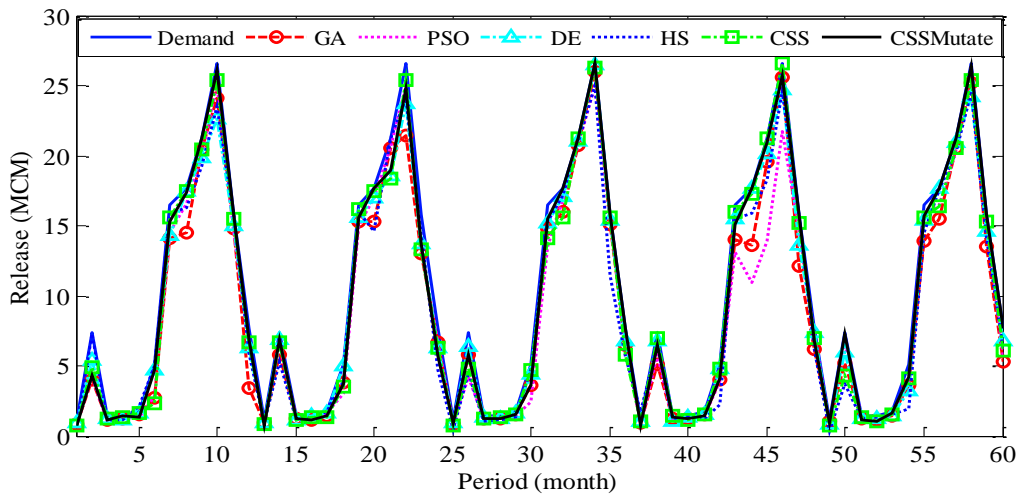


Fig. 7- Monthly optimal releases from Golestan reservoir by proposed algorithms

شکل ۷- مقدار نیاز و رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف مخزن سد گلستان

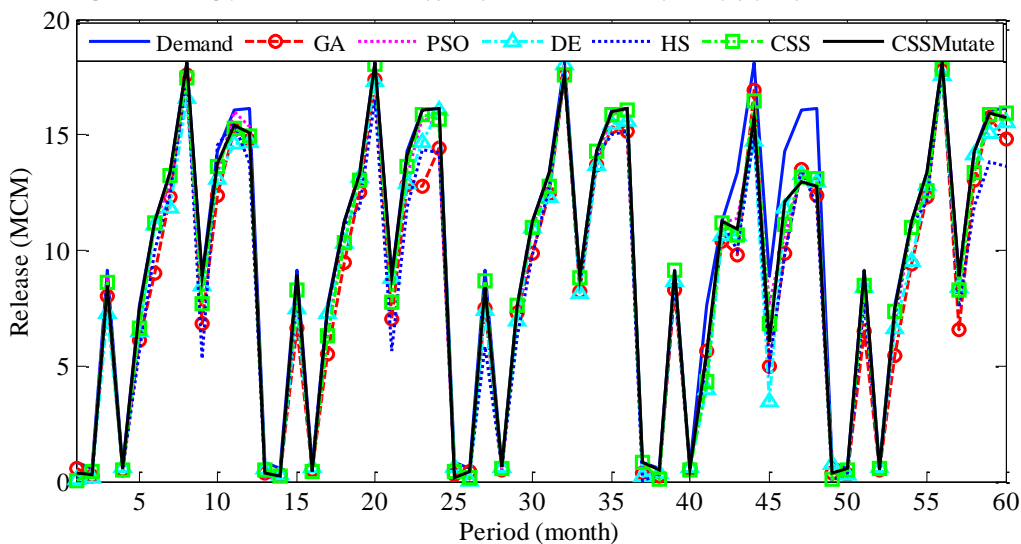


Fig. 8- Monthly optimal releases from Voshmgr reservoir by proposed algorithms

شکل ۸- مقدار نیاز و رهاسازی بدست آمده از الگوریتم‌های مختلف مخزن سد وشمگیر

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب مقدار رهاسازی به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف در مقابل نیاز پایین دست مخزن سدهای گلستان و وشمگیر در طول دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی قابل قبول بوده و با دقت مناسبی توانسته‌اند مقدار نیاز پایین دست سدهای مورد نظر را تأمین کنند. الگوریتم‌های CSS و CSS<sup>Mutate</sup> نسبت به دیگر الگوریتم‌ها عملکرد مناسب‌تری داشته و مقادیر نیاز را با اطمینان بیشتری تأمین کرده‌اند. علت این امر را می‌توان در ساختار قدرتمند آنها جستجو کرد به طوری که ساختار الگوریتم CSS بر مبنای حرکت دسته‌ای از ذرات عمل می‌کند که هر ذره دارای موقعیت و سرعت است. در این الگوریتم از قوانین فیزیک الکترونیک و قوانین حرکت مکانیک نیوتنی برای تعیین هم مقدار و هم جهت حرکت ذره باردار استفاده می‌شود. بنابراین در CSS نه تنها جهت حرکت بلکه مقدار حرکت نیز مشخص می‌شود. همچنین حفظ تعادل بین اکتشاف<sup>۲۵</sup> و بهره‌برداری<sup>۲۶</sup> دو مسأله مهم در زمینه بهینه‌سازی است به طوری که در CSS جهت حرکت با در نظر گرفتن برآیند نیروهایی که از طرف بهترین ذرات ذخیره شده در CM و برخی از بهترین ذرات در حال حاضر به ذره مورد نظر وارد می‌شود، بدست می‌آید. بنابراین در CSS تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری رعایت می‌شود. حال با توجه به عملکرد مناسب حرکت ذرات باردار در الگوریتم CSS به سمت جواب بهینه، به نظر می‌رسد با اعمال نوعی عملگر جهش بر روی تعدادی از بهترین ذرات انتخاب شده امکان حرکت آنها با یک جهش خفیف به سمت بهینه مطلق زیاد می‌شود که نتایج بدست آمده از کاربرد الگوریتم CSS<sup>Mutate</sup> حاکی از اثبات این فرضیه است.

## ۶- جمع‌بندی

در این تحقیق ضمن معرفی الگوریتم بهبود یافته جستجوی ذرات باردار، امکان استفاده از آن در حل مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن مورد بررسی قرار گرفته شد. در این راستا ابتدا به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم بهبود یافته جدید معرفی شده در مقایسه با نسخه استاندارد آن، به بهینه‌سازی ۱۸ تابع محک استاندارد ریاضی پرداخته شد. بر اساس نتایج بدست آمده با در نظر گرفتن نرخ احتمال جهش ۱۰ درصد برای الگوریتم CSS<sup>Mutate</sup> پس از انجام یک آنالیز حساسیت، این الگوریتم در ۱۷ تابع از ۱۸ تابع مورد بررسی عملکرد مناسبی از خود نشان داد. در ادامه از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک، ازدحام ذرات، تفاضل تکاملی، جستجوی هارمونی، جستجوی ذرات باردار و الگوریتم بهبود یافته جدید معرفی شده (CSS<sup>Mutate</sup>) جهت

بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های فرضی مرجع چهار و ده‌مخزنه و همچنین یک سامانه واقعی دومخزنه (سیستم مخازن حوضه آبریز گرگان‌رود) استفاده شد. نتایج بدست آمده حاکی از سرعت همگرایی مناسب و دستیابی به مقدار بهینه تابع هدف در الگوریتم CSS و نسخه جهش‌یافته آن می‌باشد. به طوری که مقادیر میانگین تابع هدف (حداکثرسازی سود حاصل در ۱۲ دوره ۲ ساعته) حاصل از ۱۰ بار اجرای مستقل الگوریتم بهبود یافته به ترتیب برای سامانه‌های مرجع چهار و ده‌مخزنه برابر با ۳۰۷/۸۳ و ۱۱۹۱/۲۹ بدست آمده که این مقادیر به ترتیب به میزان ۹۹/۸۵ و ۹۹/۷۴ درصد به جواب‌های بهینه مطلق حاصل از LP (۳۰۸/۲۹ و ۱۱۹۴/۴۴) نزدیک هستند. جهت ارزیابی نتایج در بخش سامانه واقعی دو مخزنه برای این که بتوان ترکیبی از سه معیار اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری داشت و قضاوت را براساس یک معیار واحد انجام داد، از معیار پایداری در این تحقیق استفاده شد که از بین الگوریتم‌های مورد استفاده بهترین عملکرد برای سد گلستان، مربوط به الگوریتم‌های DE و CSS<sup>Mutate</sup> و به میزان ۰/۲۲ و برای سد وشمگیر، به میزان ۰/۲۸ مربوط به الگوریتم CSS<sup>Mutate</sup> بدست آمد. با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم معرفی شده در این تحقیق پیشنهاد می‌شود در ادامه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن واقعی در کل سطح یک حوضه آبریز با لحاظ کردن بحث تلفیق آب زیرزمینی و آب سطحی در تأمین نیازها و همچنین برآورد نیازهای پایین دست مخازن به طور دقیق‌تر و به صورت پویا و دینامیک در قالب مسائل بهینه‌سازی چندهدفه مورد ارزیابی قرار گیرد.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Genetic Algorithm
- 2- Ant Colony Optimization
- 3- Particle Swarm Optimization
- 4- Differential Evolution
- 5- Harmony Search
- 6- Honey-Bee Mating Optimization Algorithm
- 7- Multi-Objective Particle Swarm Optimization
- 8- Chaotic Differential Evolution
- 9- Multi-Objective Differential Evolution
- 10- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II
- 11- Fully Constrained Particle Swarm Optimization
- 12- Water Cycle Algorithm
- 13- Nonlinear Programming
- 14- Invasive Weed Optimization
- 15- Discrete Dynamic Programming
- 16- Cuckoo Search
- 17- Krill Algorithm
- 18- Parallel Cellular Automata
- 19- Colliding Bodies Optimization
- 20- Enhanced Colliding Bodies Optimization
- 21- Vibration Particles System

- Ehteram M, Mousavi SF, Karami H, Farzin S, Emami M, Othman FB, Amini Z, Kisi O, El-Shafie A (2017) Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. *Advanced Engineering Informatics* 32:287-298
- Fallah-Mehdipour E, Bozorg-Haddad O (2012) Optimization of multipurpose reservoir operation with application particle swarm optimization algorithm. *Journal of Water & Wastewater* 23(4):97-105 (In Persian)
- Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation* 76(2):60-68
- Golestan Regional Water Company (2000) Investigation of irrigation nets of Golestan dam. 250p (In Persian)
- Holland JH (1975) *Adaption in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, 232p
- Kaveh A, Talatahari S (2010) A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta Mechanica* 213(3):267-289
- Kennedy J, Eberhart RC (1995) Particle swarm optimization. In: *Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Network* 4:1942-1948
- Kumar DN, Reddy MJ (2006) Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. *Water Resources Management* 20(6):879-898
- Larson RE (1968) *State increment dynamic programming*. Elsevier Science, New York
- Ming B, Liu P, Bai T, Tang R, Feng M (2017) Improving optimization efficiency for reservoir operation using a search space reduction method. *Water Resources Management* 31(4):1173-1190
- Murray DM, Yakowitz SJ (1979) Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control. *Water Resources Research* 15(5):1017-1027
- Rabiei M, Aalami M, Talatahari S (2018) Reservoir operation optimization using CBO, ECBO and VPS algorithms. *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 8(3):489-509
- Reddy MJ, Kumar DN (2007) Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal* 52(4):686-701
- Schardong A, Simonovic SP, Vasan A (2012) Multiobjective evolutionary approach to optimal reservoir operation. *Journal of Computing in Civil Engineering* 27(2):139-147
- 22- Charged System Search
- 23- Gravitational Search Algorithm
- 24- Hybrid GA-Krill
- 25- Exploration
- 26- Exploitation
- ۷- مراجع
- Afshar MH (2013) Extension of the constrained particle swarm optimization algorithm to optimal operation of multi-reservoirs system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 51:71-81
- Afshar MH, Azizipour M, Oghbaee B, Kim JH (2017) Exploring the efficiency of harmony search algorithm for hydropower operation of multi-reservoir systems: a hybrid cellular automata-harmony search approach. In: Del Ser J (ed) *Harmony search algorithm (ICHSA 2017)*. *Advances in intelligent systems and computing*, vol 514. Springer, Singapore, 252-260
- Afshar MH, Hajiabadi R (2018) A novel parallel cellular automata algorithm for multi-objective reservoir operation optimization. *Water Resources Management* 32(2):785-803
- Arunkumar R, Jothiprakash V (2013) Chaotic evolutionary algorithms for multi-reservoir optimization. *Water Resources Management* 27(15):5207-5222
- Asgari HR, Bozorg Haddad O, Pazoki M, Loáiciga HA (2015) Weed optimization algorithm for optimal reservoir operation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(2):04015055
- Bozorg Haddad O, Afshar A, Mariño MA (2006) Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization. *Water Resources Management* 20(5):661-680
- Bozorg Haddad O, Afshar A, Mariño MA (2011) Multireservoir optimisation in discrete and continuous domains. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 164(2):57-72
- Bozorg Haddad O, Moravej M, Loáiciga HA (2014) Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 141(5):04014064
- Chang JX, Huang Q, Wang YM (2005) Genetic algorithms for optimal reservoir dispatching. *Journal of Water Resource Management* 19(4):321-331
- Dorigo M (1992) *Optimization, learning and natural algorithms*. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

- continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 11(4):341-359
- Wolpert DH, Macready WG (1997) No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1(1):67-82
- Yousefi Gh (1991) Report of Voshmgir resevoir operation. Golestan Water Regional Company, 167p (In Persian)
- Seifollahi-Aghmiuni S (2015) A Multi-objective simulation-optimization tool development for multi-attribute design and operation of reservoir systems. Ph.D. thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian)
- Storn R, Price K (1997) Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over