

## بهره‌برداری بهینه از مخزن با استفاده از طرح‌واره‌های ژنتیک و مجموعه ذرات (مطالعه موردی: سد علویان)

یعقوب دین پژوه\*<sup>۱</sup>، محمدتقی ستاری<sup>۲</sup>، سالمه ابراهیمی<sup>۳</sup>، صابره دربندی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۱

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [dinpashoh@yahoo.com](mailto:dinpashoh@yahoo.com)

### چکیده

در این مطالعه، به منظور بهره‌برداری بهینه از آب سد علویان، از دو روش فراابتکاری (بهینه‌سازی مجموعه ذرات و طرح‌واره ژنتیک) استفاده شد. کارایی روش‌ها با شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری ارزیابی گردید. تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات نسبت کمبود به تقاضای بیشینه در طول دوره آماری ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۲ تعریف گردید. نتایج طرح‌واره منتخب با نتایج سیاست بهره‌برداری استاندارد مقایسه شد. نتایج نشان داد که طرح‌واره مجموعه ذرات با شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری به ترتیب معادل با ۸۰/۱۱، ۸۴/۹۱ و ۵۵/۸۹ درصد، مناسب‌تر از طرح‌واره ژنتیک به ترتیب با ۷۸/۹۴، ۷۵/۹۱ و ۴۶/۳ درصد می‌باشد. با توجه به شاخص‌های محاسبه‌شده برای روش سیاست بهره‌برداری استاندارد که در آن شاخص‌های قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری به ترتیب معادل با ۷۰/۸۳، ۹۸/۹۲ و ۸/۲۴ درصد بود، می‌توان نتیجه گرفت که طرح‌واره مجموعه ذرات مناسب‌تر از طرح‌واره ژنتیک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سد علویان، طرح‌واره ژنتیک، طرح‌واره مجموعه ذرات

## Optimum Operation of Reservoir Using the Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (Case Study: Alavian Dam)

Y Dinpashoh<sup>\*1</sup>, MT Sattari<sup>2</sup>, S Ebrahimi<sup>3</sup>, S Darbandi<sup>2</sup>

Received: 26 August 2015 Accepted: 31 December 2016

1. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Iran

2. Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Iran

3. M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Iran

\* Corresponding Author, Email: dinpashoh@yahoo.com

### Abstract

In this study, for the purpose of optimum utilization of water reserved in Alavian dam, two meta-heuristic methods (particle swarm optimization and genetic algorithm) were used. The performances of the methods were evaluated using the reliability, vulnerability and sustainability indices. Objective function was defined in terms of minimization of the total sum of squares of the ratios of deficits to the maximum demand during the time period of 1998 to 2013. The output of the selected algorithm was compared with that of the standard operation policy method. The results showed that particle swarm optimization algorithm having the reliability, vulnerability and sustainability indices of 80.11, 84.91 and 55.89 percentages was more suitable than genetic algorithm having the mentioned indices equal to 78.94, 75.91 and 46.2 percentages, respectively. According to the calculated indices for standard operation policy in which the reliability, vulnerability and sustainability indices were equal to 70.83, 98.92 and 8.24 percentages, it could be concluded that the particle swarm optimization algorithm was more suitable than the genetic algorithm.

**Keyword:** Alavian dam, Genetic algorithm, Optimization, Particle swarm optimization

### مقدمه

بهینه آب قابل رهاسازی را با توجه به مقدار حجم آب ذخیره شده در ماه قبل و میزان حجم آورد رودخانه با توجه به محدودیتها مشخص می‌کند (ووترابا و بروزا ۱۹۸۹).

در زمینه بهره‌برداری مخازن چند منظوره، بالتر و فونتن (۲۰۰۶) کاربرد طرح‌واره پیشنهادی کوئلو و لچاگا (۲۰۰۲) را بررسی کردند. کومار و ردی (۲۰۰۷) با استفاده از طرح‌واره‌های مختلف بهینه‌سازی (شامل مجموعه ذرات<sup>۱</sup> (PSO)، فن وزندهی و تبدیل مسئله چندمنظوره به تک‌منظوره، طرح‌واره‌های تکاملی نظیر نخبه‌گرایی و جهش در فرآیند جستجوی تک منظوره)، مسئله سیاست بهره‌برداری از آب مخزن با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برقی را مطالعه کردند. لی و

یکی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با آب، تدوین سیاست بهره‌برداری علمی از مخازن احداث شده در هر منطقه می‌باشد. تجربه خشکسالی‌ها ایجاب می‌کند که در سیاست بهره‌برداری از آب سدها بازنگری لازم به عمل آید. روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از آب ذخیره شده در مخازن وجود دارد. کلیه این روش‌ها بر مبنای یک نظام ساده ذخیره و رهاسازی آب در یک دوره زمانی معین (مانند یک سال یا یک دهه) بنا نهاده شده‌اند، طوری که براساس مشاهدات تاریخی آورد رودخانه و نیازها، رهاسازی آب با روش‌های علمی به مرحله اجرا درآید. منحنی فرمان، به‌عنوان الگوی اصلی بهره‌برداری، تعیین کننده میزان ذخیره ویا رهاسازی آب در مخازن ذخیره می‌باشد. این منحنی‌ها، میزان تغییرات مقادیر

1. Particle swarm optimization

منظور استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری سد شهرچای بکار گرفتند و نتیجه گرفتند که PSO نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد و در نهایت منحنی-های فرمان رهاسازی و حجم ذخیره برای سد شهرچای را با استفاده از این روش استخراج کردند. تقیان و همکاران (۱۳۹۰) منحنی فرمان بهره‌برداری از مخازن را با برنامه‌ریزی خطی مطالعه کردند. نتایج حاکی از آن بود که مدل ترکیبی، عملکرد خوبی در بهره‌برداری مخزن (در دو حالت نرمال و شرایط خشکی) دارد. اکبری‌آلاشتی و بزرگحداد (۱۳۹۳) از روش‌های بهره‌برداری غیرخطی (NLP)، GA، برنامه-ریزی ژنتیک (GP) و GP با موقعیت ثابت ژن (FLGGP) بهره گرفتند. تابع کل کمبود نسبی به‌عنوان تابع هدف برای ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از کارایی مناسب روش‌های GP و FLGGP بود. هدف این مطالعه، کاربرد و مقایسه دو نوع طرح‌واره بهینه‌سازی فراابتکاری (از جمله طرح‌واره ژنتیک و طرح‌واره مجموعه ذرات) در تعیین سیاست بهره‌برداری از سامانه تک‌مخزن سد علویان می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

مخزن مورد مطالعه سد علویان است که بر روی رودخانه صوفی‌چای در ۳/۵ کیلومتری شمال‌غرب مراغه واقع است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آن را نشان می‌دهد. حجم مرده و بیشینه سد به‌ترتیب برابر ۳ و ۶۰ MCM است. در جدول‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب، رژیم جریان ورودی به مخزن و توزیع نیاز ماهانه پایاب سد ارائه شده است. در این مطالعه، دوره آماری ۱۶ ساله (۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲) استفاده شد. برای تخمین حجم آب قابل تبخیر از دریاچه و همچنین حجم بارش مستقیم بر روی آن، رابطه زیر استخراج و مورد استفاده واقع شد:

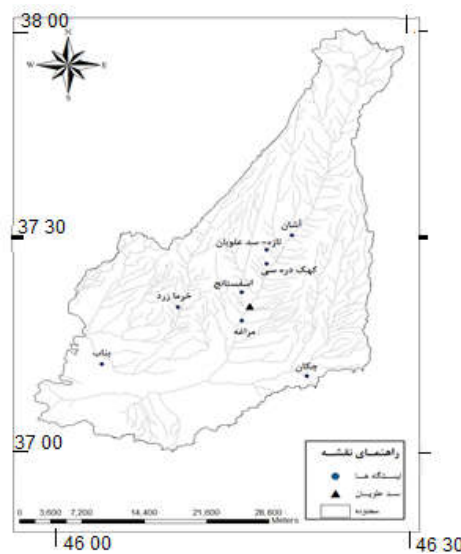
$$A_t = -0.0001S_t^2 + 0.072S_t + 0.123 \quad (R^2 = 0.993, n = 192) \quad [1]$$

وی (۲۰۰۸) با استفاده از ترکیب طرح‌واره ژنتیک (GA) اصلاح‌شده و شبیه‌سازی حرارتی<sup>۲</sup> (SA)، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه سد مخزنی را در رودخانه وجیانگ چین اجرا و نتیجه گرفتند که طرح‌واره مذکور در مدت زمان کمتری نسبت به GA اصلاح‌شده به جواب رسد و نیز روش SA این توانایی را دارد که از قید نقاط بهینه محلی رهیده و به نقطه بهینه نهایی همگرا شود. جودی‌پرکاش و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه سامانه چند مخزنی در هند، طرح‌واره GA و برنامه‌نویسی پویای SDP برای استخراج سیاست بهره‌برداری از سامانه چند مخزنی را توسعه دادند و نتیجه گرفتند که GA نتیجه بهتری نسبت به مدل SDP به‌دست می‌دهد. گائو و همکاران (۲۰۱۳) از طرح‌واره NSPSO اصلاح‌شده جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری چند منظوره از مخازن استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب طرح‌واره مذکور بود.

در ایران نیز پیرامون بهینه‌سازی تخصیص منابع آب، مطالعات مختلفی انجام شده است. مثلاً ستاری و همکاران (۲۰۰۹)، به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد علویان با هدف بیشینه‌سازی حجم آب قابل-رهاسازی برای مصارف آبیاری پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که ظرفیت تعیین شده برای مخزن سد علویان در طول مطالعات اولیه از دقت کافی برخوردار است. تقیان و همکاران (۱۳۹۰)، یک مدل بهینه‌سازی هیبرید برنامه‌ریزی خطی- طرح‌واره ژنتیک برای جستجوی مستقیم منحنی فرمان بهره‌برداری توسعه دادند. این کار با تعریف یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی بر پایه کمینه-سازی شاخص اصلاح شده کمبود در سامانه‌های چند مخزنه به‌انجام رسید و کارایی روش مورد استفاده در کاهش اثرات کمبودهای شدید در مقایسه با سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) اثبات گردید. آذرآفا و همکاران (۱۳۹۱) سه طرح‌واره PSO، GA و SA را به-

و تبخیر برای ساده‌سازی مسئله صرف‌نظر شد. جدول‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب، آورد رودخانه و نیازهای پایین دست سد علویان را نشان می‌دهد. براساس جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت که نیازهای کشاورزی، شرب و مجموع سالانه این دو در پایاب سد به‌ترتیب ۱۹/۱۰۰، ۱۰/۰۱ و ۱۱۰/۲۰ MCM می‌باشد.

که در آن،  $A_t$  و  $S_t$  به‌ترتیب، مساحت دریاچه (km<sup>2</sup>) و حجم آب ذخیره شده در سد در ماه  $t$ ام (MCM) می‌باشد. در این مطالعه، نیاز صنعت به آب سد صفر فرض شد. نیاز کشاورزی تنها برای اراضی زراعی آبی و باغات واقع در پایاب سد بدون در نظر گرفتن توسعه باغات و تغییر الگوی کشت در نظر گرفته شد. از نیاز زیست محیطی دریاچه، اثر تغییر اقلیم بر بارش، جریان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد علویان و ایستگاه‌های هیدرومتری اطراف آن.

جدول ۱- متوسط جریان ورودی ماهانه به سد علویان (۱۳۹۹-۱۳۷۷) (MCM).

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
حجم جریان	۱۷/۷۳	۳۰/۰۸	۱۷/۴۱	۴/۵۷	۱/۹۸	۱/۳۷	۲/۰۶	۳/۴۵	۳/۶۳	۳/۲۴	۳/۷۰	۶/۹۳

جدول ۲- نیاز به آب در ماه‌های مختلف در پایین‌دست سد علویان (MCM).

نیاز	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
کشاورزی	۵/۸۶	۱۰/۰۱	۲۳/۵۵	۱۹/۸۶	۱۹/۲۲	۱۰/۲۴	۴/۵۴	۱/۵۰	۳/۲۲	۱/۶۱	۰/۰۰	۰/۵۸
شرب	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۹۰	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۸۳
مجموع	۶/۶۵	۱۰/۸۵	۲۴/۴۴	۲۰/۷۱	۲۰/۱۲	۱۱/۱۶	۵/۳۳	۲/۲۸	۴/۰۶	۲/۴۱	۰/۷۹	۱/۴۰

#### طرح‌واره ژنتیک (GA)

هستند). تشکیل می‌شود و هر کروموزوم مجموعه‌ای از ژن‌ها و در واقع متغیرهای تصمیم مسئله می‌باشد. اندازه جمعیت بر عملکرد GA اثر دارد. اگر تعداد جمعیت خیلی کم باشد، به دلیل عدم جستجوی تمام فضای جواب، ممکن است طرح‌واره به جواب مطلوب همگرا

طرح‌واره ژنتیک برگرفته از فرآیند انتخاب طبیعی می‌باشد. اساس این روش مبتنی بر نظریه داروین است. GA با انتخاب مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی اولیه (به نام جمعیت) آغاز می‌گردد. هر جمعیت از مجموعه کروموزوم‌ها (که هر کدام یک جواب مسئله

این پارامتر باعث دستیابی به نقاط محلی می‌شود، انتخاب مقادیر زیاد باعث جستجوی نواحی بیشتر و در واقع کمک به انتخاب نقاط بهینه مطلق می‌گردد. تجربه نشان داده که بهتر است در ابتدا، جهت بهبود اکتشاف فراگیر در فضای جستجو مقداری بزرگ برای این پارامتر در نظر گرفته شود و به تدریج از مقدار آن کم شود.

[۳]

$$w_n = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times n}{iter_{\max}}$$

که در آن  $w_{\max}$  و  $w_{\min}$  به ترتیب، مقادیر اولیه و نهایی اینرسی وزنی و  $iter_{\max}$  بیشینه تعداد تکرارها و  $n$  شماره تکرار است. چون هیچ فرآیندی جهت کنترل سرعت ذرات وجود ندارد، یک مقدار سرعت بیشینه ( $V_{\max}$ ) فرض می‌شود که اگر سرعت از این حد فراتر رود، مقدار آن با  $V_{\max}$  جایگزین می‌گردد. مقدار این پارامتر برای فرآیند بهینه‌سازی مهم است، زیرا ممکن است به‌ازای مقادیر بزرگتر، ذرات از روی راه‌حل‌های مناسب عبور کنند. از طرفی با مقادیر کم آن، ممکن است از جستجوی مناسب جلوگیری شود. شکل ۲ فرآیند تغییر موقعیت ذرات را در روش مذکور نشان می‌دهد. از محدودیت‌های این روش به دام افتادن جواب در نقاط بهینه محلی می‌باشد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۴).

#### شاخص‌های عملکرد مخزن

به‌منظور امکان بررسی عملکرد طرح‌واره‌های GA و PSO از شاخص‌های قابلیت اعتماد<sup>۳</sup>، آسیب‌پذیری<sup>۴</sup> و پایداری<sup>۵</sup> استفاده شد.

شاخص قابلیت اعتماد، احتمال اینکه سامانه در طول دوره عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرار گیرد را ارائه می‌دهد. این شاخص

نشود و اگر تعداد آن زیاد باشد، سرعت همگرایی کند می‌گردد (لی و وی ۲۰۰۸). جزئیات این روش را می‌توان در حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۱) یافت.

#### بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO)

بهینه‌سازی PSO براساس شبیه‌سازی یک رفتار جمعی است که از نحوه حرکت توده پرندگان و ماهیان الگوبرداری شده است (کندی و ابره‌ارت ۱۹۹۵). این روش مانند سایر فنون تکاملی، از یک جمعیت که شامل راه‌حل‌های بالقوه مسئله است، جهت یافتن جواب بهینه در فضای جستجو استفاده می‌کند. مشخصه بارز روش PSO این است که هر ذره دارای یک بردار موقعیت و سرعت بوده که به‌وسیله تغییرات آن‌ها به جستجوی جواب می‌پردازد (ردی و کومار ۲۰۰۷). بردار سرعت دارای دو مؤلفه به شرح زیر است: الف- حرکت ذره به سمت بهترین موقعیتی که تاکنون تجربه کرده (pbest) است. ب- بهترین موقعیتی که یک ذره در کل جمعیت به آن رسیده (gbest) است.

با فرض فضای جستجوی  $D$  بعدی، موقعیت ذره نام را می‌توان با بردار  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$  و سرعت آن را با  $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$  نمایش داد. سرعت و موقعیت جمعیت ذرات (در تکرار بعدی) با روابط زیر مشخص می‌شود:

$$V_{id}^{n+1} = w_n \cdot V_{id}^n + c_1 r_1^n (pbest_{id}^n - X_{id}^n) \quad [1]$$

$$+ c_2 r_2^n (gbest_d^n - X_{id}^n)$$

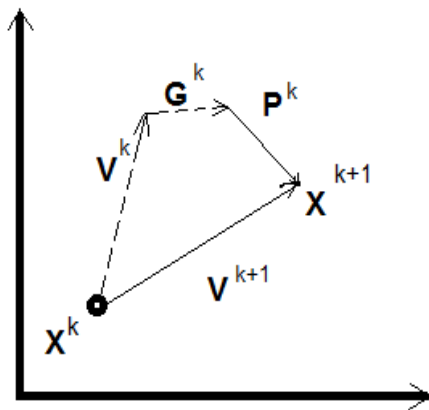
$$X_{id}^{n+1} = X_{id}^n + V_{id}^{n+1} \quad [2]$$

که در آن  $i=1,2,\dots,N$  و  $d=1,2,\dots,D$  بوده و  $N$  برابر اندازه جمعیت،  $n$  شماره تکرار،  $w$  وزن اینرسی،  $c_1$  و  $c_2$  ضرایب و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک می‌باشد. اینرسی وزنی به عنوان عامل کنترل سرعت پیشین بر سرعت فعلی است که باعث توزین مناسب سرعت در جستجوی نقاط بهینه محلی و مطلق می‌گردد. در حالی که انتخاب مقادیر کم

<sup>3</sup> Reliability

<sup>4</sup> Vulnerability

<sup>5</sup> Sustainability



شکل ۲- فرآیند تغییر موقعیت ذرات در روش PSO.

مدل ریاضی بهره‌برداری بهینه از مخزن

در این مطالعه، تابع هدف و قیدها به شرح زیر

تعریف شد:

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^N ((R_t - D_t) / D_{\max})^2 \quad [9]$$

$$\text{Subject to:} \quad [10]$$

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - Ev_t - Spill_t \quad [11]$$

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad [11]$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad [12]$$

که در آن،  $R_t$  میزان حجم آب رهاسازی،  $R_{\min}$  و  $R_{\max}$  به ترتیب، حجم کمینه و بیشینه آب رهاسازی،  $D_t$  میزان حجم آب مورد تقاضا،  $D_{\max}$  بیشینه تقاضا در طول دوره بهره‌برداری،  $S_{t+1}$  مقدار حجم آب ذخیره شده در مخزن در ماه بعد،  $S_t$  مقدار حجم آب ذخیره شده در مخزن،  $S_{\min}$  و  $S_{\max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه آب ذخیره شده در مخزن،  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن،  $P_t$  حجم بارش نازل شده بر روی دریاچه سد،  $Ev_t$  حجم آب تبخیر شده از سطح دریاچه،  $Spill_t$  حجم آب سرریز شده و اندیس  $t$  شماره ماه است.

به دو صورت زمانی و حجمی به شرح زیر قابل تعریف است. قابلیت اعتماد زمانی، درصدی از زمان است که مخزن قادر به تأمین تقاضا است (یعنی با شکست روبرو نمی‌شود). این شاخص ( $\delta$ ) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\delta = 100 \left( 1 - \frac{f}{T} \right) \quad [4]$$

که در آن  $f$  و  $T$  به ترتیب، تعداد دوره‌های مواجه با شکست و کل دوره‌های بهره‌برداری می‌باشد. قابلیت اعتماد حجمی نسبت حجم آب رهاسازی در کل دوره ( $Re_t$ ) به مقدار حجم آب مورد نیاز پایین دست مخزن ( $De_t$ ) است که از رابطه زیر به دست آمد (رزاقی و همکاران ۱۳۹۲):

$$\bar{\delta}_t = 100(Re_t / De_t) \quad [5]$$

شاخص آسیب‌پذیری ( $\eta$ )، بیانگر بزرگی شکست‌های سامانه می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه شد (هاشی-موتو و همکاران ۱۹۸۲):

$$\eta = \max[(De_t - Re_t) / De_t] \quad \text{for } t=1, 2, \dots, T \quad [6]$$

که در آن  $Re_t$  و  $De_t$  به ترتیب حجم آب مورد تقاضا و رها شده در دوره  $t$  ام و  $T$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری می‌باشد.

شاخص پایداری

لاکس (۱۹۹۷) شاخص پایداری ( $\phi$ ) را به شرح

زیر معرفی نمود:

$$\phi = \delta \gamma (1 - \eta) \quad [7]$$

که در آن  $\delta$  و  $\eta$  به ترتیب، شاخص‌های اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری می‌باشد و  $\gamma$  سرعت برگشت‌پذیری بوده که از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\gamma = \frac{1}{f / f_s} \quad [8]$$

که در آن،  $f_s$  تعداد دوره‌های شکست به طور پیوسته و  $f$  تعداد کل دوره‌های زمانی می‌باشد.

### نتایج و بحث

به‌منظور اجرای طرح‌واره‌های GA و PSO کدی در Matlab نوشته شد. جهت تخمین بهترین تعداد برای جمعیت اولیه در طرح‌واره‌های مورد بررسی، اجراهای متفاوت با جمعیت اولیه ۱۰۰ تا ۴۵۰ با تعداد تکرار ۵۰۰۰ آزمایش شد. نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

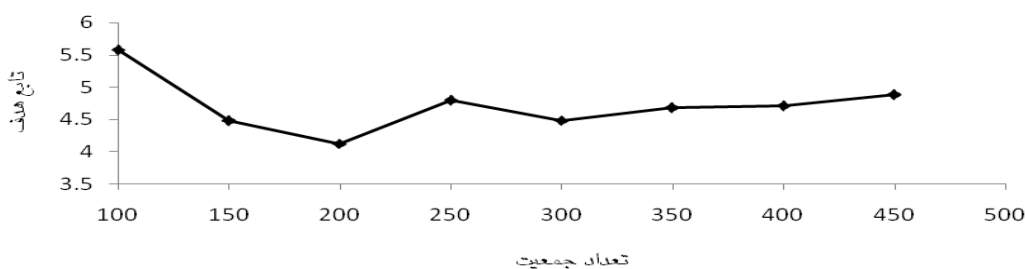
جدول ۳- پارامترهای حاصل از طرح‌واره PSO.

تعداد تکرار	تعداد ذرات	$C_1$	$C_2$	تعداد متغیرهای تصمیم
۵۰۰۰	۴۰۰	۱/۵	۱/۵	۱۹۲

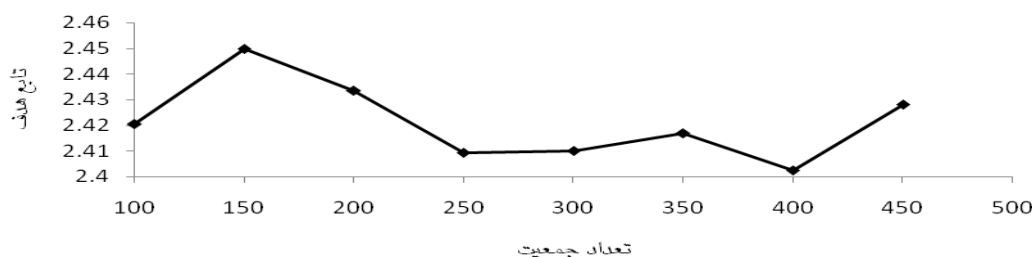
جدول ۴- مقدار تابع هدف برای احتمال‌های

مختلف جابه‌جایی و جهش ژنی.

مقدار تابع هدف	احتمال جهش درصد	احتمال جابه‌جایی درصد
۵/۲۲۴۲	۱	۴۰
۵/۴۳۹۲	۵	۴۰
۵/۰۵۲۶	۱۰	۴۰
۴/۶۷۲۶	۱	۶۰
۴/۶۹۶۲	۵	۶۰
۵/۱۴۹۹	۱۰	۶۰
۴/۲۸۸۴	۱	۸۰
۴/۴۷۶۱	۵	۸۰
۴/۳۳۹۵	۱۰	۸۰



شکل ۳- روند تغییرات مقدار تابع هدف در طرح‌واره GA.



شکل ۴- روند تغییرات مقدار تابع هدف در طرح‌واره PSO.

جدول ۵- پارامترهای طرح‌واره GA (نوع انتخاب: چرخ رولت).

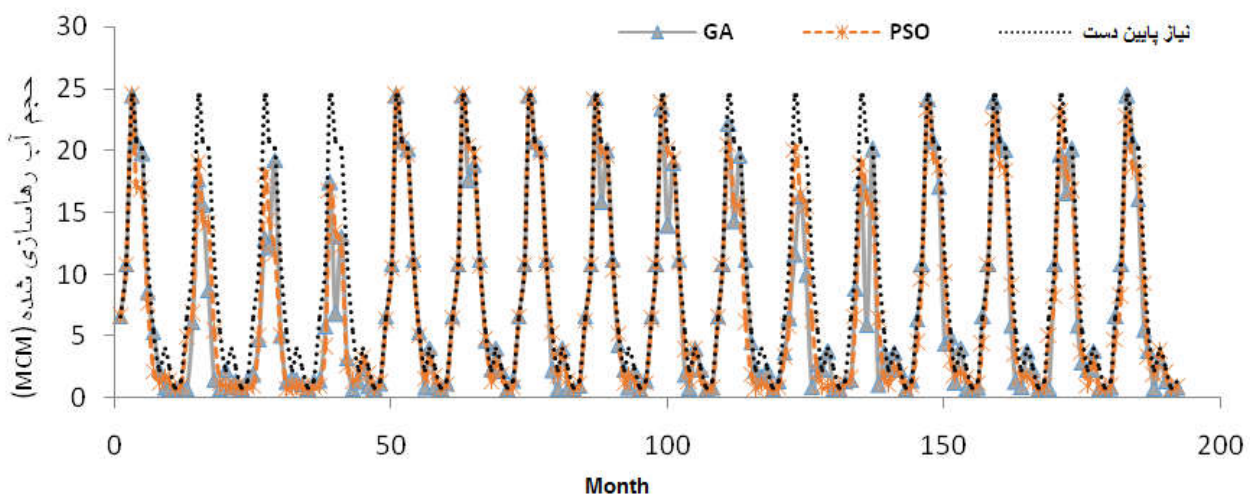
تعداد نسل‌های ایجاد شده	اندازه جمعیت	احتمال جابه‌جایی (%)	احتمال جهش (%)
۵۰۰	۳۰۰	۸۰	۳۰

جدول ۶- مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد حاصل از اجرای طرح‌واره‌ها در بهره‌برداری از مخزن سد علویان.

طرح‌واره	تابع هدف	کمبود (MCM)	قابلیت اعتماد حجمی (%)	آسیب‌پذیری (%)	شاخص پایداری (%)
GA	۴/۱۱۴۶	۳۷۱/۳۴	۷۸/۹۴	۹۱/۷۵	۴۶/۳
PSO	۲/۴۰۶۵	۳۵۰/۶۱	۸۰/۱۱۵	۸۴/۹۱	۵۵/۸۹

برای در نظر گرفتن حالت‌های متفاوت قابل استفاده در GA عملگر انتخاب چرخ رولت، با احتمال بین ۰/۴ تا ۰/۸ و عملگر جهش ژنی با احتمال بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ در ۵۰۰۰ اجرای برنامه مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۴ نتایج اجرای برنامه را نشان می‌دهد. از این جدول می‌توان دریافت که GA به همراه عملگر جابه‌جایی با احتمال ۰/۸ و عملگر جهش ژنی با احتمال ۰/۰۱ کمترین مقدار تابع هدف را تولید نموده و در نتیجه به عنوان گزینه مناسب برای اجرای نهایی مسئله انتخاب شد. مقادیر نهایی پارامترهای GA در بهره‌برداری از سد علویان در جدول ۵ درج شده است. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های GA و PSO در بهره‌برداری از سد علویان، نتایج هر یک از طرح‌واره‌ها با

یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن حاصل از اجرای طرح‌واره‌ها بر روی تابع هدف در کل دوره آماری (۱۹۲ ماه) با تکرار ۵۰۰۰ در جدول ۶ آورده شده است. با توجه به این جدول، PSO با مقدار تابع هدف ۲/۴۱ در مقایسه با GA از قابلیت بالایی برخوردار می‌باشد. طرح‌واره PSO با تأمین ۸۰/۱۱ درصد از نیازهای پایاب سد علویان و شاخص آسیب‌پذیری ۸۴/۹۱ درصد بهتر از GA می‌باشد. افزون بر این، با توجه به شاخص پایداری نیز روش PSO با مقدار ۵۵/۸۹ درصد در مقایسه با GA از عملکرد بهتری برخوردار است. شکل ۵ مقدار رهاسازی آب را با فرض پر بودن مخزن تا نصف ظرفیت آن در ابتدای دوره آماری در مقابل تقاضا نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقادیر تقاضا و رهاسازی به دست آمده از طرح‌واره‌های GA و PSO برای سد علویان (۱۳۹۲ - ۱۳۷۷).

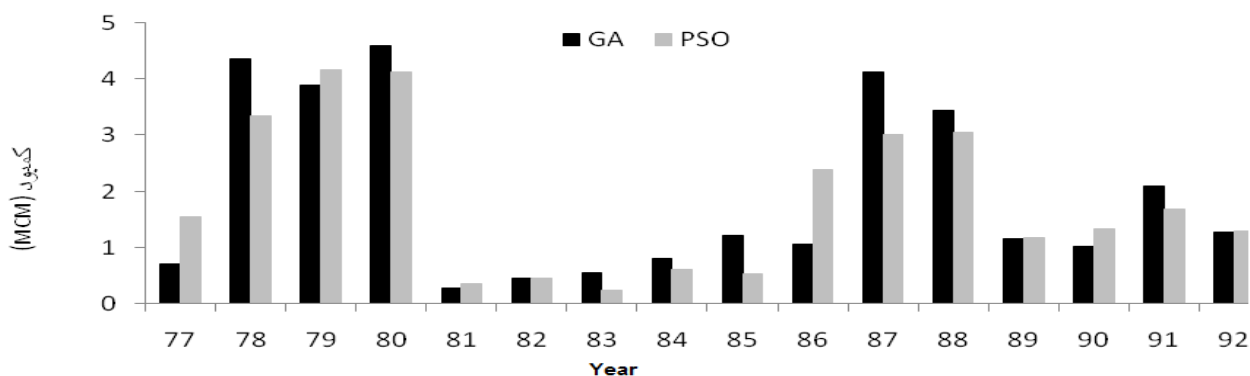
کنند، PSO نسبت به GA مناسب‌تر می‌باشد. زیرا مقادیر نیاز را با اطمینان بیشتری تأمین کرده است. شکل ۶ مقدار متوسط کمبود آب سالانه (تقاضا منهای

همان‌طور که از شکل ۵ می‌توان استنباط کرد، گرچه عملکرد هر دو روش قابل قبول بوده و با دقت مناسبی توانسته‌اند مقدار نیاز پایین دست سد مورد نظر را تأمین

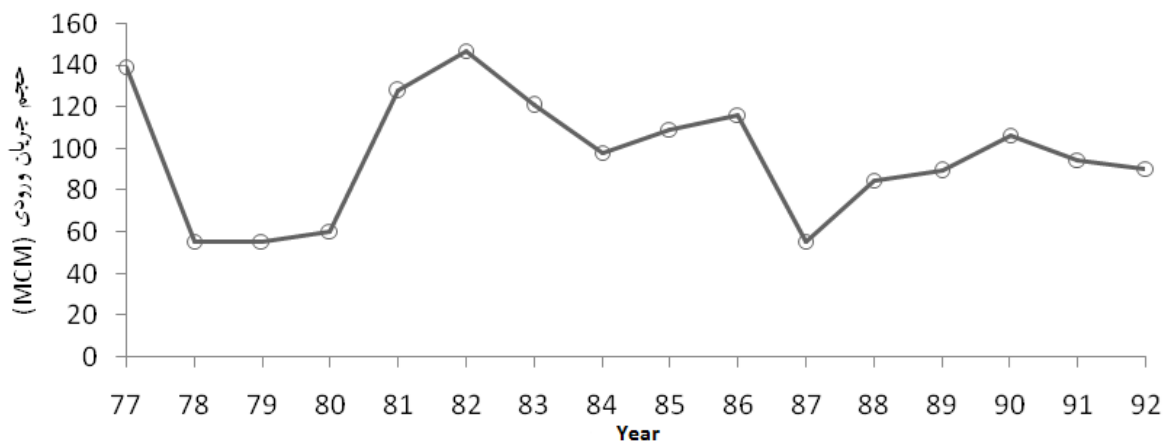


برابر با ۴/۵۹ و ۴/۱۶ MCM می‌باشد. پایین بودن مقدار کمبودها در PSO حاکی از عملکرد مناسب این روش در کمینه‌سازی کمبودها می‌باشد.

رها سازی) سد علویان که از طرح‌واره‌های GA و PSO به‌دست آمده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، شدت کمبودها در GA نسبت به PSO بیشتر است. مقدار بیشینه کمبود حجم آب سد در GA و PSO به‌ترتیب



شکل ۶- مقادیر متوسط حجم کمبود آب سالانه به‌دست آمده از طرح‌واره‌های GA و PSO برای سد علویان (۱۳۷۷-۱۳۹۲).



شکل ۷- مقادیر حجم رواناب سالانه ورودی به مخزن سد علویان در دوره آماری ۱۳۷۷-۱۳۹۲.

جمله سال‌های ترسالی است، زیرا حجم آب زیادی وارد سد شده است. در حالی‌که در سال‌های ۷۸ تا ۸۰ حجم آب ورودی نسبتاً کم می‌باشد و احتمالاً علت این موضوع در ارتباط با خشک‌سالی می‌باشد. دلیل آن این است که رواناب ورودی به مخزن از نزولات جوی تامین می‌شود و در سال‌های خشک مقدار نزولات و به تبع آن رواناب ورودی کاهش می‌یابد.

از کل ۱۶ سال، تعداد سال‌هایی که مقدار کمبود سالانه در PSO کمتر از GA می‌باشد ۹ سال بوده که این مقدار در حدود ۵۶/۲۵ درصد از سال‌ها را به‌خود اختصاص می‌دهد و در ۷ سال دیگر GA بهتر از PSO عمل کرده است. با توجه به شکل ۶، در سال‌های ۸۱ تا ۸۵ مقدار کمبود سالانه در هر دو روش به‌مراتب کمتر از سال‌های ۷۸ تا ۸۰ و ۸۷ تا ۸۸ می‌باشد که با مقایسه آن با شکل ۷ به‌نظر می‌رسد که سال‌های ۸۱ تا ۸۵ از

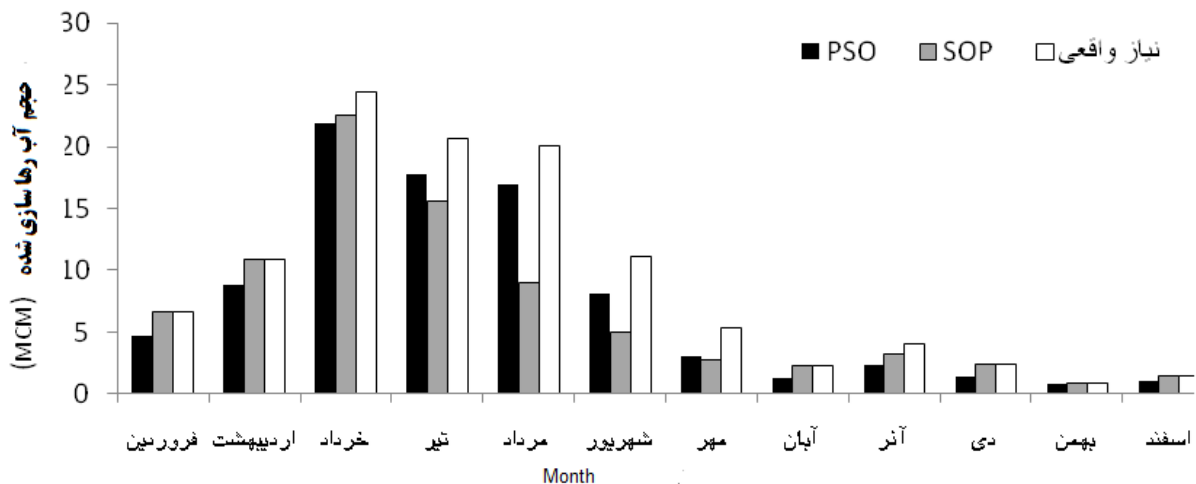
جدول ۷- مقادیر تابع هدف و شاخص‌های عملکرد مخزن با روش‌های PSO و SOP در بهره‌برداری از مخزن سد علویان.

طرح‌واره	تابع هدف	کمبود (MCM)	قابلیت اعتماد زمانی		آسیب‌پذیری (%)	شاخص پایداری (%)
			$\alpha = 0.9$	$\alpha = 0.95$		
PSO	۲/۴۰۶۵	۳۵۰/۶۱	۳۶/۹۸	۲۷/۶	۸۴/۹۱	۵۵/۸۹
SOP	۹/۹۱	۴۴۸/۸۳	۷۰/۸۳	۶۸/۷۵	۹۸/۹۳	۸/۲۴

حجم ذخیره مخزن را بررسی نمودند و معلوم شد که براساس معیارهای عملکرد مخزن منحنی‌های فرمان مطرح شده با درجه‌های توانی مختلف در مخزن کارون ۴ نسبت به روش‌های SDP و SOP عملکرد بهتری را داشته‌اند. این نتیجه با یافته‌های تحقیق حاضر تا حدودی هم‌خوانی دارد، زیرا در مطالعه فعلی برای سد علویان مشخص شد که SOP نسبت به سایر روش‌ها عملکرد خوبی نداشته است.

همان‌طور که از جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت، با وجود این‌که قابلیت اعتماد زمانی در مدل SOP نسبت به مدل PSO مقدار مناسب‌تری دارد ولی زیاد بودن مقدار تابع هدف و شاخص‌های عملکرد در روش SOP نسبت به مدل PSO دلیل بر عملکرد ضعیف SOP در بهره‌برداری از مخزن است.

بلوری‌یزدلی و همکاران (۱۳۹۰) ضمن استفاده از روش‌های SOP و SDP انواع منحنی‌های فرمان بهره‌برداری با درجه‌های توانی مختلف از آورد رودخانه و



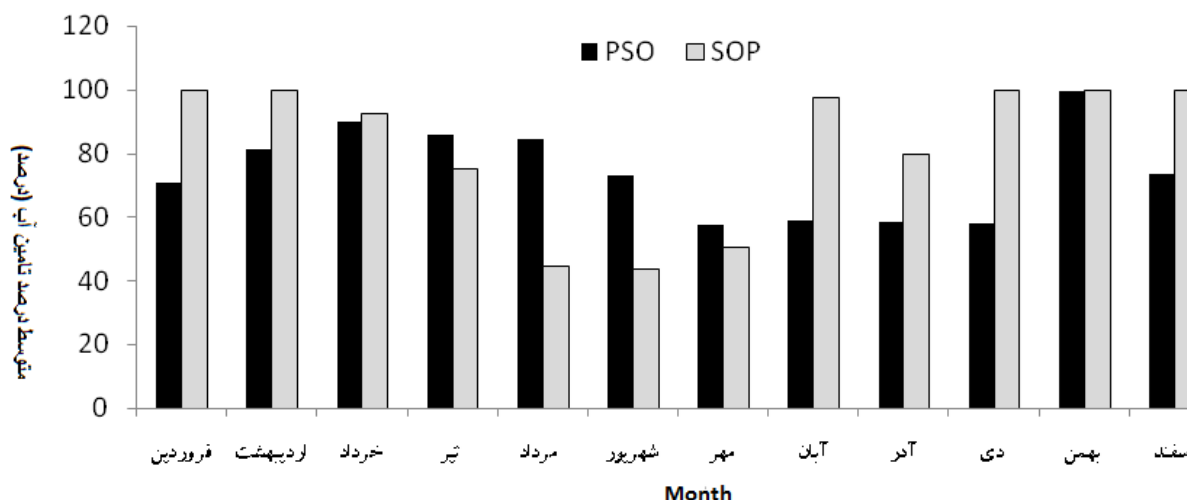
شکل ۸- مقادیر حجم آب رهاسازی به دست آمده از روش‌های SOP و PSO از سد علویان (۱۳۹۲ - ۱۳۷۷).

گرم سال که ورودی به مخزن کمتر می‌باشد نتوانسته به خوبی نیازها را تأمین کند و با کمبود آب جهت رفع نیازها روبرو است. یافته‌های فلاح مهدی‌پور و همکاران (۱۳۸۷)، معراجی و همکاران (۲۰۰۶)، آذرافزا و همکاران (۱۳۹۱) و چناری و همکاران (۱۳۹۱) نیز نشان داد که مقدار رهاسازی با استفاده از PSO به خوبی قادر به

شکل ۸ حجم آب رهاسازی ماهانه (با روش‌های SOP و PSO) را در مقابل تقاضا نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مذکور می‌توان مشاهده کرد، روش SOP در کمینه کردن کمبودهای مخزن سد علویان عملکرد بهتری داشته است، اما در مجموع نسبت به روش PSO عملکرد ضعیف‌تری داشته و در ماه‌های

متوسط درصد تأمین آب ماهانه مربوط به مدل‌های SOP و PSO را نشان داده شده است.

تأمین نیاز آبی پایین‌دست سد بوده و حجم بهینه مخزن محاسبه شده نیز در حد مطلوب می‌باشد. در شکل ۹



شکل ۹- متوسط درصد تأمین ماهانه در مدل‌های SOP و PSO برای سد علویان (۱۳۹۲-۱۳۷۷).

کمبود را در چند ماه خاص متمرکز کرده و منجر به اختلاف زیاد در تأمین آب آن ماه‌ها می‌گردد.

برای تعریف سیاست‌های بهره‌برداری مخزن، رهاسازی آب از مخزن در هر دوره زمانی می‌تواند به-عنوان تابعی از حجم آب ذخیره شده در مخزن، آورد رودخانه و یا نیاز پایین‌دست در نظر گرفته شود. انتخاب هر یک از این پارامترها به اهداف مورد نظر و اهمیت هر یک در تعیین مقدار رهاسازی بستگی دارد. تابعی که به صورت معمول (موسوی و همکاران ۲۰۰۷ و بزرگ‌حداد و همکاران ۲۰۰۸) به عنوان منحنی فرمان بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود، به شرح زیر است:

$$R_{t+l} = f(S_t, I_t) = aS_t + bI_t + c \quad [13]$$

که در آن،  $f$  تابعی از متغیرهای تصمیم شامل  $I_t$  مقدار حجم جریان آب ورودی به مخزن و  $S_t$  حجم آب ذخیره شده در آن در ماه  $t$  است. همچنین ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  با روش‌های مختلف بهینه‌سازی به دست می‌آیند. در این مطالعه حجم آب رهاسازی در هر ماه با توجه به مقدار حجم آب ذخیره شده در سد و جریان ورودی به آن (در ماه قبل) به شرح زیر حاصل شد.

متوسط درصد تأمین ماهانه در مدل سیاست بهره-برداری استاندارد (SOP) در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد بیشتر از مدل PSO می‌باشد. با توجه به اینکه در این ماه‌ها جریان ورودی به مخزن زیاد و نیازها نسبتاً کم می‌باشد، مدل SOP سعی در تأمین بیشینه نیازها داشته ولی PSO با رویکردی آینده-نگری درصدی از نیازها را تأمین و بقیه را جهت استفاده در دوره‌های بعدی ذخیره نموده است. مدل SOP در ماه‌های گرم سال عملکرد ضعیفی داشته، به-طوری‌که در سه ماه مرداد، شهریور و مهر تقریباً قادر به تأمین ۵۰ درصد تقاضا بوده است. در حالی‌که PSO با رویکردی آینده‌نگر درصد بیشتری از نیاز ماه‌های تیر تا مهر را نسبت به مدل SOP تأمین نموده است. در حالت کلی، اگر بر روی دوازده ماه سال میانگین گرفته شود مدل‌های SOP و PSO به ترتیب، با تأمین ۸۲/۰۵ و ۷۴/۲۱ درصد قادر به تأمین نیازها بوده‌اند ولی باید اذعان کرد که PSO گرچه نسبت به SOP درصد تأمین نیاز کمی دارد ولیکن مقادیر کمبود در هر ماه در طول زمان (ماه‌ها) توزیع می‌شود و شدت کمبود متمرکز بر یک ماه خاص نیست. در حالی‌که روش SOP شدت

با توجه به محدودیت‌های مطالعه و مفروضات مختلف به دست آمده و لازم است هنگام استفاده از نتایج مطالعه فعلی مفروضات مذکور مدنظر قرار گیرد. افزون بر این، مطالعه فعلی تنها با رویکرد ذخیره درون‌سالی انجام شده است و ذخایر برون‌سالی مدنظر واقع نشده است. استفاده بهینه از آب در شرایطی که خشکسالی‌های اخیر به‌طور طبیعی در منطقه موجب کاهش آب شده و از طرفی بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی نگرانی‌های زیادی را در دشت‌های مختلف منطقه دامن زده است و رویه خشک شدن دریاچه اورمیه ایجاب می‌کند که از آب موجود در مخازن استفاده علمی به‌عمل آید.

**سپاسگزاری:** بدینوسیله از داوران محترم و مدیر محترم مجله که با صرف وقت ارزشمند خود ما را در بهبود کیفیت این مقاله یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

$$R_{t+1} = 0.345S_t - 0.014I_t - 1.227 \quad (R^2 = 0.649, N = 192)$$

### نتیجه‌گیری کلی

طرح‌واره‌های فراابتکاری که بیشتر در طی دو دهه اخیر مورد توجه دانشمندان مختلف قرار گرفته‌اند، اخیراً در بهینه‌سازی سامانه مخازن نیز استفاده شده‌اند. در این پژوهش به بررسی عملکرد دو نوع از طرح‌واره‌های فراابتکاری در زمینه بهره‌برداری از مخزن مورد بحث قرار گرفته و برای استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری مخزن سد علویان به‌کار گرفته شده است. در ابتدا به بررسی عملکرد طرح‌واره ژنتیک (GA) و طرح‌واره مجموعه ذرات (PSO) پرداخته شد و PSO به‌عنوان روش مناسب انتخاب شد. سپس از آن جهت استخراج منحنی فرمان استفاده شد. نتایج حاصل از طرح‌واره PSO در بهره‌برداری بلندمدت از آب مخزن سد علویان استفاده شد. تأمین ۸۰/۱۱۵ درصد از نیازهای پایین‌دست حاکی از عملکرد مناسب این طرح‌واره نسبت به GA می‌باشد. لازم به ذکر است این نتایج

### منابع مورد استفاده

- آذرافزا، ه. رضایی، ح. بهمنش ج و بشارت س، ۱۳۹۱. مقایسه نتایج بکارگیری الگوریتم‌های PSO، GA و SA در بهینه‌سازی سامانه‌های تک‌مخزنه (مطالعه موردی: سد شهرچای، ارومیه). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، صفحه‌های ۱۱۰۸ تا ۱۱۰۱.
- اکبری‌آلشتی ح و بزرگ حداد، ۱۳۹۳. استخراج قواعد ایستا و پویای بهره‌برداری مخزن توسط برنامه‌ریزی ژنتیک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۳، صفحه‌های ۴۹۲ تا ۵۰۲.
- بزرگ حداد، ۱۳۸۴. بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها با استفاده از طرح‌واره بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبورهای عسل (HBMO). رساله دکتری تخصصی، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- بلوری‌یزدلی، بزرگ‌حداد، قاجارنیا، فلاح مهدی‌پور ا و خیاط خلقی، ۱۳۹۰. رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری ماهانه زمان حقیقی در مخازن. مجله مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دوره ۴۵، شماره ۵، صفحه‌های ۵۰۵ تا ۵۱۵.
- تقیان م، رادمنش ف، آخوندعلی عم و حقیقی ع، ۱۳۹۰. بهینه‌سازی منحنی فرمان بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی با توسعه یک مدل هیبریدی برنامه‌ریزی خطی-الگوریتم ژنتیک. مجله پژوهش آب ایران، دوره ۵، شماره ۹، صفحه‌های ۹۰-۸۳.
- چناری ک، عبقری ه، عرفانیان م و قلیزاده س، ۱۳۹۱. ارائه مدل کوتاه مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب با استفاده از طرح‌واره جامعه ذرات و مقایسه آن با طرح‌واره ژنتیک. پژوهش‌های آب‌خیزداری، شماره ۹۷، صفحه‌های ۶۳ تا ۷۲.
- رزاقی پ، بابازاده ح و شوریان م، ۱۳۹۲. توسعه سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن چند منظوره در شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از مدل MODSIM 8.1. مجله حفاظت منابع آب و خاک، سال ۳، شماره ۲، صفحه‌های ۱۱ تا ۲۳.

- فلاح‌مهدی‌پور ا، بلوری‌یزدلی ی، بزرگ‌حداد ا، ۱۳۸۷. استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن سد در براساس طرح‌واره PSO. چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۷-۱۹ اردیبهشت، دانشگاه تهران.
- Balter AM and Fontane DG, 2006. A multi-objective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning. Pp 1544-1552. In: Proceeding of International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montreal, Canada.
- Bozorg Hadad O, Afshar A and Marino MA, 2008. Honey- Bee Mating Optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs. *Journal of Hydro-informatics* 10(3): 257- 264.
- Coello C and Lechuga MS, 2002. MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. Pp. 1051-1056. In: Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE Service Center. Piscataway, Honolulu HI.
- Guo X, Hu T, Wu C, Zhang T and Lv Y, 2013. Multi-objective optimization of the proposed multi-reservoir operating policy using improved NSPSO. *Water Resources Management* 27(7): 2137-2153.
- Hashimoto T, Stedinger JR and Loucks DP, 1982. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1): 14- 20.
- Hassanzadeh Y, Abdi A, Talatahari S, and Singh VP, 2011. Meta-Heuristic algorithms for hydrologic frequency analysis. *Water Resources Management* 25:1855-1879.
- Holland JH, 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press. 211Pp.
- Jothiprakash V, Shanthi G and Arunkumar R, 2011. Development of operational policy for a multi-reservoir system in India using genetic algorithm. *Water Resources Management* 25(10): 2405-2423.
- Kennedy J and Eberhart R, 1995. Particle Swarm Optimization. Pp 1942-1948. In: Proceeding of the International Conference on Neural Networks. Pert Australia, IEEE, Piscataway.
- Kumar D and Reddy J, 2007. Multiple reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133(3): 192-202.
- Li XG and Wei X, 2008. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. *Journal of Water Resources Management* 22: 1031-1049.
- Loucks DR, 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-530.
- Loucks DR, Stedinger JH and Haith DA, 1981. *Water Resource System Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, W.J.
- Meraji SH, Afsahr MH and Afshar A, 2006. Reservoir operation by particle swarm optimization algorithm. Pp. 201-208. In: 7th International Conference of Civil Engineering (ICCE7 th), Tehran, Iran.
- Mousavi SJ, Ponnambalam K and Karray F, 2007. Inferring operating rules for reservoir operations using Fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Sets and Systems* 158(10): 1064- 1082.
- Reddi MJ and Kumar DN, 2007. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. *Hydrological Processes* 21: 2897-2909.
- Sattari MT, Apaydin H and Ozturk F, 2009. Operation analysis of Eleviyan irrigation reservoir dam by optimization and stochastic simulation. *Journal of Stochastic Environmental Research Risk and Assessment* 23(8):1187-1201.
- Taghian M, Rosbgerg D, Haghghi A and Madsen H, 2014. Optimization of conventional rule curves coupled with hedging rules for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(5): 693-698.
- Votruba L and Broza V, 1989. *Function in Reservoirs, Water Management System, Developments in Water Science Series* 33: 343- 367. Elsevier Science Publishing Company.
- Zhang Z, Jiang Y, Zhang S, Geng S, Wang S and Sang G, 2014. An adaptive particle swarm optimization algorithm for reservoir operation optimization. *Applied Soft Computing* 18:167 -177.