

«یادداشت تحقیقاتی»

کاربرد الگوریتم رقابت استعماری در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن با هدف حداکثرسازی تأمین نیاز (مطالعه موردی: سد پیشین)

سید آرمان هاشمی منفرد^{1*}، فهیمه حسین‌زاده²، بهاره پیرزاده³

1-3- استادیار گروه مهندسی عمران، عضو هیئت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
2- دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

* hashemi@eng.usb.ac.ir

چکیده - منابع آب سطحی نقش عمده‌ای در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت دارا می‌باشند. با توجه به تغییرات زمانی آب‌دهی رودخانه‌ها و عدم هم‌خوانی آن با نیازهای موجود، اعتمادپذیری تأمین آب کاهش می‌یابد و باعث بروز خسارت در بخش‌های مختلف می‌شود. از همین رو برای استفاده مناسب از آب ذخیره شده در سدها باید به مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن نگاه ویژه‌ای داشت. بهره‌برداری از مخازن سدها از جمله مسائل مهم در مهندسی آب است که تاکنون از طریق انواع روش‌های بهینه‌سازی به آن پرداخته شده است. در دو دهه اخیر الگوریتم‌های فراکاوشی، موفقیت قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داده‌اند. در این تحقیق مقادیر بهینه برداشت آب از مخزن سد پیشین با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) که یکی از الگوریتم‌های پیوسته فراکاوشی مبتنی بر تکامل سیاسی- اجتماعی است، تعیین شد. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد پیشین برای یک دوره 12 ماهه که میانگین دوره 41 ساله (82-1341)، می‌باشد، صورت گرفت. تابع هدف به صورت مجموع مربعات اختلاف رهاسازی از تقاضای مخزن در هر دوره تعریف شد. عملکرد الگوریتم رقابت استعماری با الگوریتم ازدحام ذرات و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. متوسط مقدار تابع هدف در دو الگوریتم ازدحام ذرات و رقابت استعماری به ترتیب برابر 3/9804 و 3/9808 بدست آمد که نشان دهنده عملکرد یکسان این دو الگوریتم است. همچنین نتایج نشان داد که شدت کمبودهای حاصل از دو الگوریتم بهینه‌ساز نسبت به روش سیاست بهره‌برداری استاندارد، 31/1 درصد کاهش داشته‌است.

کلیدواژگان - الگوریتم رقابت استعماری، روش‌های فراکاوشی، سد پیشین، بهینه‌سازی مخزن.

1- مقدمه

جمله سدها کشانده است. تاکنون روش‌های فراوانی برای انتخاب بهینه‌ترین سیاست بهره‌برداری ابداع و ارائه شده است که در این میان، استفاده از الگوریتم‌های طبیعی و فراکاوشی در مدل‌سازی و حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این توجه به دلیل عدم قابلیت روش‌های کلاسیک و سنتی

بهینه‌سازی مخزن دارای پیچیدگی‌هایی است که بعضاً حل آنها با روش‌های معمول امکان‌پذیر نبوده و یا مقرون به صرفه نمی‌باشد. وجود همین پیچیدگی‌ها و لزوم استفاده از ابزار مناسب، محققان را به جستجوی روش‌های جدید در حل مسائل سیستم‌های منابع آب از

تطبیقی اصلاح شده (Zhang et al., 2014) اشاره کرد. ظهور روش‌های جدید بهینه‌سازی و عملکرد موفق آن در علوم مختلف منجر به استفاده آن‌ها در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب گردید. تعیین منحنی‌های فرمان بهینه سد دز (Afshar et al., 2014) و حل مدل بهینه بهره‌برداری مخزن توسط الگوریتم رقابت استعماری² (Karamouz et al., 2014) از جمله این تحقیقات به شمار می‌آیند.

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، روش‌های فراکاوشی در دهه‌های اخیر توانسته‌اند در زمینه بهینه‌سازی مخزن موفق عمل کنند. همچنین ظهور الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید تا حدودی توانسته نقاط ضعف الگوریتم‌های قدیمی‌تر را پوشش دهد. به همین منظور در این پژوهش در ابتدا به بررسی عملکرد هریک از الگوریتم‌های رقابت استعماری و ازدحام ذرات در تعدادی از توابع معیار پرداخته شده و در ادامه مسأله بهره‌برداری از مخزن سد پیشین به‌عنوان یک مسأله بهینه‌سازی در حوزه مهندسی آب مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مطالعه موردی

در این تحقیق سامانه تک‌مخزن سد پیشین به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این سد در مختصات $50^{\circ}59'$ تا $58^{\circ}61'$ طول شرقی و $35^{\circ}25'$ الی $02^{\circ}27'$ عرض شمالی در ضلع جنوب غربی شهر پیشین واقع شده است. این منطقه به دلیل قرار گرفتن در ناحیه جنب حاره از میزان بارندگی کم، با دمای متوسط سالانه بالا و تبخیر زیاد برخوردار است (سازمان آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، 1384). سد پیشین با حجم کمینه 8 میلیون مترمکعب و حجم بیشینه 175 میلیون مترمکعب وظیفه تأمین نیاز آبی اراضی باهوکلات به مساحت 6000 هکتار و همچنین نیاز آبی شهر چابهار را بر عهده دارد. به منظور مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد پیشین از متوسط جریان ورودی ماهانه به مخزن در یک دوره 41 ساله (82-1341)

در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی با ابعاد بزرگ و مسائل غیرخطی و زمان محاسباتی بیش‌تر آن‌هاست (سارانی، 1390). در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن از روش‌های فراکاوشی گوناگونی استفاده شده است. در تحقیقی کارایی الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل در بهینه‌سازی مخزن بررسی و عملکرد آن مناسب گزارش شد (Bozorghaddad et al., 2006, Afshar et al., 2007). الگوریتم جستجوی ممنوعه رتبه‌معیار به منظور تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن سد دز ارائه شد. (افشار و حسینی نورزاد، 1387).

هم‌زمان با انجام این تحقیقات، پژوهش‌هایی نیز توسط محققان دیگر با استفاده از الگوریتم مورچگان صورت گرفت. از جمله می‌توان به توسعه الگوریتم مورچگان به منظور بکارگیری در بهینه‌سازی مخزن (Jalali et al., 2006) و بررسی عملکرد این الگوریتم در بهینه‌سازی سیستم چند مخزنه (Kumar and Reddy, 2006) اشاره کرد.

الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات به صورت گسترده‌ای در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور مثال سیاست‌های بهینه بهره‌برداری مخزن با وارد کردن عدم قطعیت در جریان ورودی مخزن توسط الگوریتم ژنتیک توسعه‌یافته تعیین و بر اثربخشی روش نامبرده تأکید شد (Jothiprakash & Shanti, 2009). مطالعه بر روی کارایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مخزن و استفاده از نسخه‌های جدیدتر ادامه یافت. در این مطالعات نسخه‌های ارتقا یافته الگوریتم ژنتیک از قبیل الگوریتم ژنتیک خودآموز (Hakimi et al., 2010) و $NSGAI^1$ بکار گرفته و عملکرد مناسب آن تأیید شد (حجتی و همکاران، 1392). در بیان کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات در تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری مخزن می‌توان به بکارگیری آن در بهینه‌سازی مخزن سد کلان ملایر در شرایط خشک‌سالی هیدرولوژیکی (نژاد نادری و همکاران، 1390). ارائه الگوریتم اجتماع ذرات کاملاً محدود (Afshar et al., 2012) و الگوریتم اجتماع ذرات

² Imperialist Competitive Algorithm

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

محدودیت‌های دیگر در مدل بهره‌برداری مخزن به صورت روابط (5) و (6) در مدل‌سازی وارد شده‌اند.

$$0 \leq R_t \leq D_t \quad (5)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (6)$$

$$sp(t) = \begin{cases} S(t) + I(t) - R(t) - E(t) > S_{\max} \\ \rightarrow S(t) + I(t) - R(t) - E(t) \\ S(t) + I(t) - R(t) - E(t) \leq S_{\max} \\ \rightarrow 0 \end{cases} \quad (7)$$

محدودیت اول که به صورت رابطه (5) بیان شده است، به دلیل اینکه مربوط به متغیرهای تصمیم مسأله است، می‌تواند در فرایند اصلی الگوریتم با تعریف بازه مجاز برای ایجاد جمعیت تصادفی اعمال شود. برای ارضا نمودن قیودات مربوط به متغیرهایی جز متغیرهای تصمیم از توابع جریمه استفاده شده است. رابطه (7) بیانگر میزان سرریز مخزن است.

2-3- شاخص‌های عملکرد سیستم

به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف بهینه‌سازی و انتخاب مدل مناسب، شاخص‌های عملکرد سیستم می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. این معیارها شامل اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری هستند که به ترتیب با روابط (8) تا (10) محاسبه می‌شوند (فرهنگی و بزرگ‌حداد، 1389).

$$Rel = \frac{\sum_{t=1}^T R_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad (8)$$

در این رابطه Rel ، اعتمادپذیری حجمی مخزن می‌باشد.

$$vul = \max_{t=1}^T \left(\frac{D_t - R_t}{D_t} \right) \quad (9)$$

vul ، میزان آسیب‌پذیری سیستم را نشان می‌دهد.

استفاده شده است. در جدول 1 توزیع ماهانه نیاز آبی و متوسط جریان ورودی مخزن سد پیشین آورده شده است (کرد تمینی، 1392).

2-2- مدل بهره‌برداری مخزن

به منظور تعیین مدل بهره‌برداری مخزن، تابع هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مربعات اختلاف رهاسازی از تقاضای پایین‌دست در یک دوره 12 ماهه در نظر گرفته شده که به صورت رابطه (1) تعریف می‌گردد:

$$\text{Min}Z = \sum_{t=1}^T (D_t - R_t)^2 \quad (1)$$

در این رابطه Z ، تابع هدف، T ، طول دوره بهره‌برداری مخزن (12 ماهه)، D_t ، مقدار نیاز هر ماه (میلیون مترمکعب) و R_t ، رهاسازی مخزن در هر ماه (میلیون مترمکعب) می‌باشد. رابطه پیوستگی مخزن رابطه‌ای اساسی است که بیان آن در مخزن توسط آن تعیین می‌گردد. رابطه (2) بیانگر معادله پیوستگی مخزن است.

$$S(t+1) = S(t) + I(t) - R(t) - E(t) - sp(t) \quad (2)$$

$$E(t) = A(t) \times H(t) \quad (3)$$

$$A(t) = aS^3(t) + bS^2(t) + cS(t) + d \quad (4)$$

در این روابط $A(t)$ ، سطح مخزن در هر ماه (کیلومتر مربع)، $H(t)$ ، ارتفاع تبخیر از سطح مخزن (متر) و a ، b ، c و d ضرایب بدست آمده از رابطه سطح-حجم مخزن می‌باشند که به ترتیب برابر 3×10^{-6} ، $-0/001$ ، $0/171$ و $0/149$ هستند.

جدول 1 توزیع ماهانه نیاز آبی و جریان ورودی مخزن سد پیشین (میلیون مترمکعب) (کرد تمینی، 1392)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
جریان ورودی	29/637	11/533	6/377	23/761	22/903	6/082	3/099	13/788	9/731	14/081	41/432	35/393
نیاز آبی	8/69	9/51	8/78	6/45	5/592	8/672	12/07	13/67	15/22	11/8	10/27	10/58

ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و یک نوع همگرایی رخ خواهد داد.

$$Res = \frac{f_s}{F} \quad (10)$$

در این رابطه، Res ، برگشت‌پذیری، f_s تعداد سری‌های شکست و F تعداد کل شکست‌ها هستند.

2-4- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری از یک پدیده اجتماعی- انسانی الهام گرفته و به فرایند استعمار به عنوان مرحله‌ای از تکامل سیاسی- اجتماعی بشر نگریسته و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده تاریخی، از آن به عنوان منشا الهام یک الگوریتم قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی بهره برده است. این الگوریتم برای اولین بار توسط آتش‌پز (1387) معرفی شده است. الگوریتم رقابت استعماری، همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آن‌ها یک "کشور" نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست و باقی‌مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را به سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، به صورت رابطه (11) مدل شده است (آتش‌پز گرگری، 1387).

$$TC_n = cost(imperialist_n) + \xi \text{mean}\{cost(coloniesofimperialist_n)\} \quad (11)$$

که در آن TC_n هزینه کل امپراطوری n ام و ξ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود.

با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید، از صحنه رقابت حذف خواهد شد. در نتیجه در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های

2-5- الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات از رفتار اجتماعی حیوانات مانند گروه پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته است. صاحبان اصلی ایده این الگوریتم کندی و ابرهات (1995) بودند. این الگوریتم با تشکیل جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام ذره نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضای تصمیم که در آن قرار دارد، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از موقعیت فعلی خود (x^i) و بهترین موقعیتی که در آن قرار داشته (x^{ibest}) و همچنین با استفاده از اطلاعات بهترین ذره در بین تمامی ذرات (x^{gbest}) جهت حرکت خود را انتخاب می‌کند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت ذره با استفاده از روابط (12) و (13) بروزرسانی می‌شود. این فرایند تا اتمام تکرارها، ادامه خواهد داشت و در نهایت بهترین ذره (ذره با حداقل تابع هدف) به عنوان جواب نهایی مسأله انتخاب خواهد شد.

$$v^i(t+1) = wv^i(t) + c_1 r_1 (x^{ibest}(t) - x^i(t)) + c_2 r_2 (x^{gbest}(t) - x^i(t)) \quad (12)$$

$$x^i(t+1) = x^i(t) + v^i(t+1) \quad (13)$$

در این روابط، w ضریب اینرسی، c_1 و c_2 ضرایب یادگیری، v سرعت حرکت ذره و r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ می‌باشند.

تمامی کدهای الگوریتم رقابت استعماری، ازدحام ذرات و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد در محیط نرم‌افزار MATLAB R2013b نوشته و پیاده‌سازی شده است.

3- نتایج و بحث

در این بخش از پژوهش ابتدا عملکرد الگوریتم‌ها در تعدادی از توابع معیار ریاضی مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه به شرح نتایج مسأله بهره‌برداری مخزن سد

ازدحام ذرات در دو تابع Sphere و Rastrigin مؤید این گفته است.

پیشین به عنوان مسأله بهینه‌سازی در حوزه مهندسی آب پرداخته شده است.

3-1-1-3 مسائل نمونه

3-1-1-3 Sphere تابع

این تابع، مدل ریاضی غیرخطی است که به صورت مجموع مربعات متغیرها نشان داده می‌شود. معادله (14)، نشان دهنده فرمول ریاضی این تابع است (Afshar et al., 2006).

$$Sphere = \sum x_i^2 \quad (14)$$

این تابع توسط دو الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات با در نظر گرفتن تعداد جمعیت‌های مختلف تحلیل و نتایج حاصل از آن در جدول 2 ارائه شده است. همچنین محدوده و تعداد متغیرها و مقدار بهینه نهایی این تابع از از تحقیقات گذشته (Afshar et al., 2006) برداشت شده است.

جدول 2 مقادیر بهینه تابع Sphere

Sphere			
	تعداد متغیرها = 30	محدوده متغیرها = [-100,100]	
تعداد جمعیت	100	150	200
PSO	$7/757 \times 10^{-31}$	$1/047 \times 10^{-37}$	$2/919 \times 10^{-47}$
ICA	$1/11 \times 10^{-19}$	$1/86 \times 10^{-21}$	$4/79 \times 10^{-25}$
بهینه مطلق	0	0	0

3-2-1-3 Rastrigin تابع

این تابع، تابع غیرخطی مرکب از توابع کسینوسی و توابع درجه دو می‌باشد. فرمول ریاضی این تابع در رابطه (15)، نشان داده شده است (Afshar et al., 2006).

$$Rastrigin = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \times \cos(2\pi x_i) + 10)^2 \quad (15)$$

مشابه حالت قبل، مقادیر بهینه این تابع نیز با در نظر گرفتن جمعیت‌های مختلف توسط دو الگوریتم معرفی شده بدست آمده است. جدول 3، مقادیر بهینه حاصل از مدل‌های تدوین شده را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج جداول 2 و 3، نشان می‌دهد که قدرت الگوریتم‌های مورد نظر در حل مسائل مختلف متفاوت است. چنان‌که نتایج بهینه بدست آمده از الگوریتم

جدول 3 مقادیر بهینه تابع Rastrigin

Rastrigin			
	تعداد متغیرها = 30	محدوده متغیرها = [-5/12,5/12]	
تعداد جمعیت	100	150	200
PSO	63/356	48/502	31/672
ICA	$2/87 \times 10^{-28}$	$6/31 \times 10^{-30}$	$3/16 \times 10^{-30}$
بهینه مطلق	0	0	0

الگوریتم ازدحام ذرات در رسیدن به جواب بهینه نهایی تابع Sphere تقریباً موفق عمل کرده است، اما نتوانسته به جواب عمومی تابع Rastrigin دست پیدا کند. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد جمعیت اولیه این الگوریتم، می‌توان به بهبود جواب‌های بدست آمده کمک کرد. الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، برخلاف الگوریتم ازدحام ذرات، در هر دو مسأله توانسته است جواب‌هایی نزدیک جواب بهینه عمومی ایجاد کند؛ گرچه عملکرد آن در پیدا کردن جواب بهینه تابع Rastrigin بهتر بوده است.

3-2-3 مسأله بهره‌برداری مخزن سد پیشین

یکی از گام‌های اصلی الگوریتم‌های فراکاوشی تعیین مقدار بهینه پارامترهای آن‌ها است. انتخاب مقدار مناسب پارامترها تاثیر مهم و اساسی در تعیین جواب بهینه مسأله دارد. تنظیم پارامترهای این الگوریتم‌ها مانند سایر روش‌های فراکاوشی با روش آزمون و خطا و آنالیز حساسیت تابع هدف صورت می‌پذیرد. این مقادیر با در نظر گرفتن جمعیت اولیه 100 برای هر دو الگوریتم بدست آمدند. جدول 4 مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم‌های رقابت استعماری و ازدحام ذرات را نشان می‌دهد. با توجه به تشکیل تصادفی جمعیت اولیه الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در فرایند اجرای الگوریتم‌ها جواب‌های تصادفی ایجاد خواهد شد. بنابراین جواب‌های حاصل از هر الگوریتم در اجراهای مختلف متفاوت خواهد بود. بنابراین با یک اجرای الگوریتم نمی‌توان در مورد کارایی آن قضاوت کرد. به

همین دلیل باید الگوریتم بیش از یک بار اجرا شود.

جدول 4 مقادیر پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات و رقابت استعماری

PSO		ICA	
مقدار	شرح	مقدار	شرح
1	w	5	تعداد امپراطوری‌ها
1/5	C_1	$\pi/4$	θ
1	C_2	0/2	ξ

در این تحقیق 10 اجرای مختلف با 100 تکرار برای هر الگوریتم در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج اجراهای مختلف، مقدار متوسط تابع هدف حاصل از الگوریتم رقابت استعماری 3/9808 و مقدار متوسط تابع هدف در الگوریتم ازدحام ذرات 3/9804 بدست آمده است. جدول 5 نتایج اجراهای مختلف الگوریتم‌های مذکور، همراه با شاخص‌های آماری مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول 5 نتایج اجراهای مختلف الگوریتم ICA و PSO

مقدار تابع هدف		تعداد اجرا
PSO	ICA	
3/9804	3/9806	1
3/9804	3/9804	2
3/9804	3/9817	3
3/9804	3/9804	4
3/9804	3/9811	5
3/9804	3/9817	6
3/9804	3/9807	7
3/9804	3/9804	8
3/9804	3/981	9
3/9804	3/9804	10
3/9804	3/9808	متوسط تابع هدف
3/9804	3/9804	حداقل تابع هدف
3/9804	3/9817	حداکثر تابع هدف
0	0/00052	انحراف معیار
0	0/00013	ضریب تغییرات

با توجه به مطالب بیان شده الگوریتمی که جواب‌های حاصل از اجراهای مختلف آن به هم نزدیک باشد، عملکرد بهتری دارد. بنابراین الگوریتم ازدحام ذرات با

ضریب تغییرات صفر نسبت به الگوریتم رقابت استعماری با ضریب تغییرات 0/00013 عملکرد مناسب‌تری دارد. البته به دلیل اختلاف ناچیز مقادیر ضریب تغییرات دو الگوریتم می‌توان گفت عملکرد یکسانی دارند.

پس از اجرای دو الگوریتم و روش سیاست بهره‌برداری استاندارد برای مدل بهره‌برداری مخزن سد پیشین، مقادیر خروجی حاصل از سه روش با یکدیگر مقایسه شد. برای مقایسه عملکرد دو الگوریتم، بهترین عملکرد آن‌ها در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که دو الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات عملکرد یکسانی دارند. اما این دو روش کمبودهای کمتری را نسبت به روش سیاست بهره‌برداری استاندارد ایجاد کرده‌اند، به طوری که میزان کمبود دو الگوریتم 31/1 درصد از روش سیاست بهره‌برداری استاندارد کمتر است. شکل 1 مقادیر خروجی را در کنار تقاضای مخزن بر اساس روش‌های نامبرده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود اگر چه در روش سیاست بهره‌برداری استاندارد تنها در یک ماه عدم تأمین نیاز وجود دارد، اما میزان کمبود از کل کمبودهایی که در سه ماه اول در دو الگوریتم رخ داده است، بیش‌تر است.

از نظر معیار اعتمادپذیری، سه روش تفاوت چندانی ندارند. مقدار اعتمادپذیری برای هر سه روش 97 درصد بدست آمده است. معیار آسیب‌پذیری بر اساس نتایج حاصل از دو الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات معادل 0/0918 و بر اساس روش سیاست بهره‌برداری استاندارد برابر 0/227 بوده است. همچنین میزان برگشت‌پذیری سیستم در روش سیاست بهره‌برداری استاندارد، الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات به ترتیب برابر 1، 0/33 و 0/33 بدست آمده است. تفاوت قابل ملاحظه سه روش در میزان برگشت‌پذیری به دلیل عملکرد متفاوت این روش‌ها در تعیین میزان رهاسازی مخزن است. در روش سیاست بهره‌برداری استاندارد میزان رهاسازی بر اساس ذخیره مخزن در هر ماه تعیین می‌گردد، به طوری که اگر میزان ذخیره هر ماه برابر یا بیش‌تر از تقاضای مخزن باشد، بدون توجه به وضعیت ماه‌های آتی نیاز آن ماه به طور کامل تأمین می‌گردد.

4- نتیجه گیری

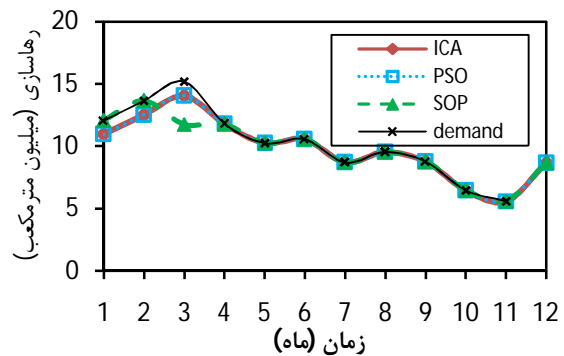
هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی الگوریتم رقابت استعماری به عنوان یک روش فراکاوشی در حوزه بهینه‌سازی، در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد با هدف حداکثرسازی تأمین نیاز بود. به همین منظور سد پیشین به عنوان مطالعه موردی انتخاب و مدل بهره‌برداری آن با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات انحراف تقاضا از رهاسازی در یک دوره 12 ماهه تهیه شد. پس از مدل‌سازی، الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات به منظور حل این مدل بهینه استفاده شد. همچنین نتایج حاصل از این دو الگوریتم با روش سیاست بهره‌برداری استاندارد مقایسه شد.

نتایج نشان داد که دو الگوریتم رقابت استعماری و ازدحام ذرات با متوسط تابع هدف 3/9804 و 3/9808 عملکرد یکسانی دارند. از نظر معیار اعتمادپذیری هر سه روش با اعتمادپذیری 97 درصد وضعیت مشابهی داشتند. اما از نظر آسیب‌پذیری دو الگوریتم با آسیب‌پذیری 0/0918 نسبت به روش سیاست بهره‌برداری استاندارد با آسیب‌پذیری 0/227 عملکرد بهتری داشته‌اند. روش سیاست بهره‌برداری استاندارد با برگشت‌پذیری 1 بهترین عملکرد را در خروج از بحران در بین سه روش داشته است.

5- فهرست علائم

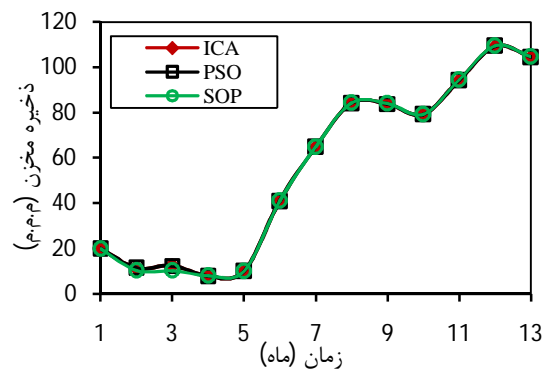
$A(t)$	سطح مخزن
C	هزینه نرمال شده امپریالیست
C	هزینه هر امپریالیست
d	فاصله میان مستعمره و استعمارگر
D_t	تقاضای مخزن در هر ماه (MCM)
$E(t)$	تلفات آب از مخزن (MCM)
F	تعداد کل شکست‌ها
f_s	تعداد سری‌های شکست
$H(t)$	ارتفاع تبخیر (m)
$I(t)$	ورودی مخزن (MCM)
$N.C.$	تعداد مستعمرات امپریالیست
$N.T.C$	هزینه کل نرمال امپراطوری
N_{col}	تعداد کشورهای مستعمره

در صورتی که در الگوریتم‌های بهینه‌سازی میزان خروجی مخزن در هر ماه با هدف حداقل کردن کمبودها در کل دوره بهره‌برداری تعیین می‌شود.



شکل 1 مقادیر رهاسازی در سه مدل بهره‌برداری مخزن

شکل 2 تغییرات مربوط به حجم مخزن در سه روش مورد استفاده را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که قید مربوط به حجم مخزن در هر سه روش به درستی برقرار است، به طوری که در کل دوره بهره‌برداری از محدوده مجاز تجاوز نکرده و حجم مخزن از مقدار کمینه آن (8 میلیون مترمکعب) کمتر نشده است. با توجه به شکل‌های 1 و 2 می‌توان گفت عدم تأمین نیاز در الگوریتم‌های رقابت استعماری و ازدحام ذرات در سه ماه اول دوره بهره‌برداری به دلیل قرار گرفتن حجم مخزن در سطح حداقل در این ماه‌ها است. بنابراین به منظور رعایت محدودیت حجم مخزن در مدل بهره‌برداری، در این ماه‌ها نیاز به طور کامل تأمین نشده است.



شکل 2 تغییرات حجم مخزن در سه مدل بهره‌برداری مخزن

ویرایش دوم.
 فرهنگی، م. و بزرگ حداد، 1. (1389). "ارزیابی معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت سیستم در شرایط کم آبی (مطالعه موردی: حوضه کارون)", مجله پژوهش آب ایران، شماره هفتم، ص.ص. 33-46.
 کرد تمینی، ا. (1392). "تعیین سیاست‌های بهینه رهاسازی آب از مخزن سد با استفاده از برنامه‌ریزی پویا"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
 نژاد نادری، م.، حسامی کرمانی، م.ر. و هاشمی نسب، س. (1390). "کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی جامعه پرندگان در تعیین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کلان ملایر"، اولین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین نگهداشت انرژی، تهران.

Afshar, M.H., Ketabchi, H. and Rasa, E. (2006). "Elitist continuous ant colony optimization algorithm: application to reservoir operation problems", International Journal of Civil Engineering, Vol. 24, pp. 274-285.

Afshar, A., Bozorg Haddad, O., Marino, M.A. and Adams, B.J. (2007). "Honey-Bee Mating Optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation", Journal of Franklin Institute, Vol. 20, pp. 452-462.

Afshar, M.H. (2012). "Large scale reservoir operation by constrained particle swarm optimization algorithms", Journal of Hydro-Environment Research, Vol. 6, pp.75-87.

Afshar, A., Emami Skardi, M.J. and Masoumi, F. (2014). "Optimizing water supply and hydropower reservoir operation rule curves: An imperialist competitive algorithm approach". Engineering Optimization, Vol 47, pp. 1208-1225.

Bozorg Haddad, O., Afshar, A. and Marino, M.A. (2006). "Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization", Water Resources Management, Vol. 20, pp. 661-680.

Hakimi-Asiabar, M., Ghodsypour, H. and Kerachian, R. (2010). "Deriving operating policies for multi-objective reservoir systems. Application of self-learning genetic algorithm", Applied Soft Computing, Vol. 10, pp. 1151-63.

Jalali, M.R., Afshar, A. and Marino, M.A. (2006). "Improved ant colony optimization algorithm for

N_{imp}	تعداد امپریالیست‌ها
P	قدرت نسبی نرمالیزه هر امپریالیست
P_p	قدرت تصاحب مستعمره توسط هر امپراطوری
Rel	اعتمادپذیری
Res	برگشت‌پذیری
R_t	رهاسازی مخزن (MCM)
$S(t)$	ذخیره مخزن (MCM)
S_{max}	حداکثر حجم مخزن (MCM)
S_{min}	حداقل حجم مخزن (MCM)
$sp(t)$	سرریز مخزن (MCM)
TC	هزینه کل هر امپراطوری
vul	آسیب‌پذیری
Z	تابع هدف (MCM)
θ	زاویه انحراف (rad)
ξ	ضریب تاثیر مستعمرات در قدرت امپراطوری

6- منابع

آتش‌پز گرگری، ا. (1387). "توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران.

افشار، م. و حسینی نورزاد، ح. (1387). "مدیریت بهینه بهره‌برداری برقابی مخزن سد به روش جستجوی ممنوعه"، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی، تهران، ایران.

حجتی، ع، فریدحسینی، ع، قهرمان، ب. و علیزاده، ا. (1392). "مقایسه کاربرد روش‌های فراکاوشی در سیستم‌های چندهدفه منابع آب (مطالعه موردی: سد استور و پیرتقی در حوضه آبریز قزل اوزن)", مجله مهندسی آب و محیط زیست ایران، دوره اول، ص.ص. 9-14.

حسینی موغاری، س.م. و بنی‌حبیب، م.ا. (1393). "بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب"، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، دوره سوم، شماره 4، ص.ص. 17-31.

سارانی، س. (1390). "بررسی کاربرد الگوریتم‌های مدرن در سیستم‌های منابع آب"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان. (1384). "گزارش هیدرولوژی طرح افزایش گنجایش سد پیشین"،

Karamouz, M., Nazif, S., Sherafat, M.A. and Zahmatkesh, Z. (2014). "Development of an optimal reservoir operation scheme using extended evolutionary computing algorithms based on conflict resolution approach: A case study", *Water Resources Management*, Vol. 28, pp. 3539-54.

Zhang, Zh., Jiang, Y., Zhang, Sh., Geng, S., Wang, H. and Sang, G. (2014). "An adaptive particle swarm optimization algorithm for reservoir operation optimization", *Applied Soft Computing*, Vol. 18, pp.167-77.

reservoir operation", *Scientica Iranica*, Vol. 13, pp. 295-302.

Jothiprakash, V. and Shanthi, G. (2009). "Comparison of policies derived from stochastic dynamic programming and genetic algorithm models", *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 1563-80.

Kumar, N.D. and Reddy, M.J. (2006). "Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation", *Water Resources Management*, Vol. 20, pp. 879-898.