

ارائه روش هیبریدی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها مبتنی بر هوش مصنوعی

محمد احترام^{۱*}

سید فرهاد موسوی^۲

حجت کرمی^۳

نیوشا تهرانی^۴

آیدین امیری^۵

چکیده

مخازن سدها به‌عنوان یکی از سازه‌های مهم در زمینه مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب در نظر گرفته می‌شوند. لذا، بهره‌برداری از مخازن و نحوه رهاسازی آب از آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مطالعه، الگوریتم تکاملی جدیدی در راستای بهره‌برداری از مخازن در نظر گرفته شده است. الگوریتم مذکور، ترکیبی از الگوریتم هارمونی و ازدحام ذرات است که سبب می‌گردد روش‌های ازدحام ذرات و هارمونی تقویت گردند. به‌گونه‌ای که مشکل عدم تعادل میان قابلیت پویا و انتفاع در روش ازدحام ذرات حل گردد و همچنین احتمال به دام افتادن روش هارمونی در بهینه‌ی محلی کاهش یابد. علاوه بر آن، پاسخ‌هایی که در روش ازدحام ذرات در چارچوب فضای منطقی حل قرار نمی‌گیرند توسط روش هارمونی اصلاح می‌گردند. روش مذکور در جهت بهره‌برداری از مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ و با هدف کاهش کمبودها و یا افزایش تولید انرژی استفاده گردیده است. مقایسه‌ی نتایج بیانگر آن است که روش هیبریدی پاسخ نزدیک‌تری به پاسخ بهینه‌ی مطلق مسائل نسبت به سایر روش‌ها دارد. علاوه بر آن، نتایج روش هیبریدی در شبیه‌سازی نحوه رهاسازی آب، ذخیره‌ی آب و تولید برق در مخزن سدهای مهاباد و کارون ۴ با نتایج برنامه‌ریزی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار لینگو، انطباق قابل توجهی دارد.

واژه‌های کلیدی

بهینه‌سازی، مخزن سد، روش ازدحام ذرات، الگوریتم هارمونی.

*۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، eh.mohammad@yahoo.com.

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۴. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه مک‌گیل، مونترال، کبک، کانادا.

۵. دانشجوی دکتری، امپریال کالج لندن، انگلستان.

مقدمه

ساخت سدها از حدود پنج هزار سال پیش آغاز گردیده است. به‌گونه‌ای که تأمین و ذخیره‌ی آب و رهاسازی به‌موقع آب از اهداف ساخت سدها بوده است (نیکنام^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). تنظیم تغییرات سطح آب و تأمین نیازهای مختلف نظیر کشاورزی، آبرسانی شهری و آبیاری از جمله اهداف ایجاد سدها است (عروجی^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، در ارتباط با بهینه‌سازی سدها است (ملکوئی^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). بهینه‌سازی منابع آب تنها مربوط به ساختار فیزیکی سیستم نمی‌شود. بلکه ضوابط مربوط به سیستم را نیز در برمی‌گیرد (رشید و دیاکن^۴، ۲۰۰۷). مسائل مربوط به تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی شامل قیود مختلف هستند که مسئله‌ی بهینه‌سازی مخزن سد جدا از این موارد نیست (ریچاردسون^۵، ۲۰۰۸). بهینه‌سازی مخازن سدها شامل رویکردها و راهکارهایی است که تنظیمات رهاسازی، زمان رهاسازی و در نظر گرفتن تأمین نیازهای مختلف و محدودیت‌ها است (بازیار و کاووسی فرد^۶، ۲۰۱۳). سیستم مخازن گاه شامل یک مخزن و در بعضی از موارد شامل چند مخزن است که حل چنین مسائلی دارای پیچیدگی‌های خاصی است (دیپ و بانسال^۷، ۲۰۰۹). سدها موانعی در جهت عبور آب ایجاد می‌کنند که می‌تواند دریاچه‌ی مصنوعی در پشت سد ایجاد گردد. مخازن سدها در حقیقت ناشی از وجود همین جمع‌شدگی آب است (فلاح مهدی‌پور^۸ و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از اهداف سدها و مخازن آن‌ها، تولید برق به کمک نیروگاه است. مقدار انرژی تولیدشده بستگی به توربین‌ها و همچنین اختلاف بار آبی دارد (جیم و کیم^۹، ۲۰۰۱). طی سال‌های اخیر، استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها از جمله روش‌های مؤثر بوده است. جیم و کیم (۲۰۰۱) از روش هارمونی جهت بهینه‌سازی مخازن سدها استفاده نمودند و نتایج مؤثری با در نظر گرفتن یک تابع هدف مشخص و کمینه‌سازی کسب نمودند. فلاح مهدی‌پور و همکاران (۲۰۱۳) از روش ژنتیک توسعه‌یافته برای بهینه‌سازی مخازن استفاده نمودند که سبب توسعه‌ی

روش‌های قبلی شد. ردی و مانوج^{۱۰} (۲۰۱۲) با استفاده از روش فراکاوشی جدید، مقادیر افت را در سیستم‌های آبرسانی به حداقل رساندند. با توجه به اینکه یکی از موارد مهم در الگوریتم‌های تکاملی، تعادل میان قابلیت پوشش و انتفاع است، در این راستا، از الگوریتم تکاملی جدیدی در این اثر پژوهشی استفاده گردیده است. در حقیقت، قابلیت پوشش، جستجوی آزادانه‌ی فضای جستجو، بدون توجه به دستاوردهای الگوریتم است و قابلیت انتفاع، به میزان توجه به دستاوردهای الگوریتم در طول فرایند جستجو گفته می‌شود. در روش ازدحام ذرات، تعادل خوبی بین دو حالت برقرار ناست. عدم تعادل بین هر دو حالت سبب عدم دستیابی به جواب‌های دقیق می‌گردد. به‌طوری‌که اگر در یک الگوریتم قابلیت پوشش بیشتر باشد، رفتارهای الگوریتم به شکل غیرقابل‌پیش‌بینی خواهند بود. همچنین، اگر قابلیت انتفاع بیشتر باشد، رفتار محتاطانه‌ی الگوریتم بیشتر می‌گردد. از طرفی، وجود الگوریتم ازدحام ذرات به الگوریتم هارمونی کمک می‌کند که در دام بهینه‌های محلی گرفتار نگردد. علاوه بر آن، یکی از مشکلاتی که در ارتباط با الگوریتم ازدحام ذرات وجود دارد، نحوه‌ی برخورد با ذراتی است که در فضای منطقی مسئله، موقعیت یا سرعت آن‌ها به‌دست نیامده باشد. لذا، با استفاده از الگوریتم هارمونی می‌توان این ذرات را دوباره تولید نمود؛ بنابراین، استفاده از روش هیبریدی مذکور می‌تواند به حل مشکلات ذکرشده کمک نماید. در این پژوهش، از روش هیبریدی مذکور برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری از مخازن سدها استفاده گردیده است. با توجه به اینکه روش هیبریدی مذکور برای اولین بار در زمینه مدیریت منابع آب معرفی می‌گردد، می‌توان افق جدیدی را برای طراحان ترسیم نمود. به‌گونه‌ای که پتانسیل این روش با حل دو مسئله‌ی بهره‌برداری از مخزن به‌خوبی مشخص می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در الگوریتم هارمونی، هر حل یک هارمونی است. هر حل، به شکل یک بردار، شامل چندین بُعد است. برای روش هارمونی، نخست یک جمعیت اولیه‌ی تصادفی معرفی می‌شود. حل‌های

⁶ Baziar & Kavooosifard

⁷ Deep & Bansal

⁸ Fallah-Mehdipour

⁹ Geem & Kim

¹⁰ Reddy & Manoj

¹ Niknam

² Orouji

³ Malakooti

⁴ Rashid & Diacon

⁵ Richardson

$$X_{new}(j) = X_{new}(j) + BW(j) \times r \quad (5)$$

۴. به روزرسانی حافظه

بعد از ایجاد بردار هارمونی جدید، مقدار HM باید به روزرسانی گردد و تابع هدف مربوط به جدیدترین عضو با بدترین عضو مقایسه می گردد. اگر تابع هدف مربوط به بردار جدید بهتر از بردار قبل باشد، جایگزین می شود. در غیر این صورت، مراحل ۳ و ۴ تا رسیدن به شرط توقف ادامه می یابد.

الگوریتم هارمونی اصلاح شده

در الگوریتم هارمونی اصلاح شده، تعدادی از پارامترها به شرح زیر اصلاح می شوند:

۱. پارامتر HMCR

در این شیوه، مقدار ۱ به ۰/۹ بقیه‌ی حل‌ها اختصاص می گیرد و تنها در ۰/۱ راه‌حل‌ها، این مقدار تصادفی انتخاب می شود. در ۰/۹ بقیه‌ی حل‌ها تنها مقادیر حافظه اصلاح می شوند.

$$X_i(j) = LB_j + (UB_j - LB_j) \times r, j=1, \dots, n, i=1, \dots, HMS \quad (2)$$

۲. پارامتر PAR

حل مسئله با مقدار بیشینه این پارامتر شروع می شود. در ادامه، با گذشت هر ۰/۱ تعداد کل تکرارها، پارامتر بر اساس معادله‌ی زیر به روزرسانی می شود:

$$PAR = PAR - \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{9} \quad (6)$$

مقادیر بیشینه این پارامتر بین ۰/۹ و ۱/۰ است و مقادیر کمینه این پارامتر بستگی به تعداد بردارهای متغیر جواب دارد.

۳. پارامتر BW

در صورت ورود بردار هارمونی جدید به حافظه، مقدار بهبود تابع هزینه نسبت به بدترین عضو محاسبه و به ازای BW متناظر ذخیره می گردد. بعد از گذشت تکرار، مقادیر متوسط این پارامتر با توجه به تغییرات تابع هزینه اصلاح می شود.

$$IF_{Improvement_{up}} > Improvement_{low} \quad BW_M = BW_M + \frac{BW_M}{30} \quad (7)$$

$$IF_{Improvement_{up}} > Improvement_{low} \quad BW_M = BW_M + \frac{BW_M}{30} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۷)، $Improvement_{up}$ بیانگر مجموع بهبودهای تابع هزینه در طول تکرار به ازای BW_M هایی است که مقدار آن به اندازه $\frac{BW_M}{10}$ بیشتر بوده و $Improvement_{low}$ نشان‌دهنده‌ی مجموع بهبودهای تابع هزینه در طول تکرار به

مربوطه در حافظه‌ی الگوریتم به نام HM ذخیره می شود (ردی و مانوج، ۲۰۱۲). سپس، برداری جدید مبتنی بر حافظه و تنظیمات زیر و بهم ایجاد می شود. بردار ایجاد شده با بدترین بردار موجود در حافظه مقایسه می گردد و در صورت بهتر بودن این بردار، جایگزین بردار قبل می شود. فرایند مربوطه تا برقراری شرط پایان الگوریتم ادامه می یابد. مراحل این الگوریتم به ترتیب زیر است:

۱. معرفی مسئله و پارامترهای مربوط به الگوریتم

$$\text{Min } F(\vec{X}), \vec{X} = (x_1, \dots, x_n); x_j \in [LB_j, UB_j] \quad (1)$$

که در آن $F(\vec{X}) =$ تابع هزینه، $\vec{X} =$ بردار متغیرهای طراحی، $n =$ تعداد متغیرهای طراحی، $LB_j =$ حد پایینی متغیر و $UB_j =$ حد بالایی متغیر. پارامترهای الگوریتم شامل اندازه‌ی حافظه‌ی هارمونی (HMS)، نرخ در نظر گرفتن حافظه (HMCR)، نرخ تنظیم زیر و بم (PAR) و پهنای باند (BW) می باشند.

۲. مقداردهی اولیه به حافظه‌ی هارمونی

HM شامل HMS بردار هارمونی است. اگر فرض شود که $\vec{X} = (x_1, \dots, x_n)$ i امین بردار جواب HM باشد، بردارهای جواب مجموعه‌ی HM بر اساس رابطه‌ی زیر ایجاد می گردد که در آن r یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. ماتریس HM با بردار HMS به شکل زیر پر می گردد:

$$HMS = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & x_n(n) \\ x_{HMS}(1) & x_{HMS}(2) & x_{HMS}(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

۳. بهبود هارمونی

یک بردار جواب جدید بر اساس سه دستور بهبود داده می شود. در نظر گرفتن حافظه، تغییر زیر و بمی و انتخاب تصادفی از موارد مطرح شده هستند. ابتدا یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب می گردد. اگر عدد مطرح شده از HMCR کوچک تر باشد، بردار جدید از HM انتخاب می شود. در غیر این صورت به صورت تصادفی به دست می آید. انتخاب بردار جدید از HM طبق رابطه‌ی زیر است:

$$X_{new}(j) = X_a(j), a \in \{1, \dots, HMS\} \quad (4)$$

که X_{new} به عنوان بردار تصادفی جدید است. چنانچه بردار مذکور از HM انتخاب شود، پارامتر PAR لحاظ می گردد. سپس، عدد تصادفی دیگری انتخاب می گردد. اگر این عدد کوچک تر از پارامتر مذکور باشد بردار جدید به صورت زیر تغییر می کند:

۶. چنانچه موقعیت ذراتی در فضای منطقی مسئله به‌دست نیامده باشد، به‌وسیله روش هارمونی اصلاح‌شده، این ذرات دوباره تولید می‌گردند.

۷. با توجه به اصلاح موقعیت ذرات در مرحله‌ی قبل و تولید ذرات جدید، سرعت و موقعیت ذرات بر اساس معادله ۱۰ به‌روزرسانی می‌گردد.

۸. ضابطه‌ی شرط کنترل گردد. در صورتی که رضایت‌بخش بود، الگوریتم پایان یافته است. در غیر این صورت، به مرحله‌ی ۳ بازمی‌گردیم.

در ادامه، به مطالعه‌ی روش هیبریدی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدهای مهاباد و کارون ۴ پرداخته می‌شود

مدل بهینه‌سازی مخزن سد مهاباد

تابع هدف، بهینه‌سازی مخزن این سد بر اساس ظرفیت نصب نیروگاه و میزان برق تولیدشده است:

$$\text{Minimize } D = \sum_{t=1}^T \left[1 - \frac{P(t)}{P(c)} \right] \quad (11\text{-الف})$$

همچنین، معادله‌ی پیوستگی عبارت است از:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - E_t \quad (11\text{-ب})$$

که R_t = مقدار خروجی در ماه، D_t = مقدار نیاز آبی پایین‌دست، S_t = مقدار ذخیره در ماه، I_t = مقدار آب ورودی، E_t = مقدار تبخیر از سطح مخزن، $P(t)$ = مقدار برق تولیدشده در نیروگاه و $P(c)$ = ظرفیت نصب نیروگاه.

حجم تبخیر بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E_t = A_t (e_t - p_t) \quad (12)$$

که در آن E_t = حجم تبخیر از سطح مخزن، e_t = ارتفاع تبخیر از سطح مخزن، p_t = ارتفاع بارندگی روی سطح زمین و A_t = مساحت مخزن.

محدودیت‌های حاکم بر مسئله شامل روابط زیر هستند:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (13)$$

$$R_t \leq h_t p_{\max} \quad (14)$$

$$R_t + G_t = D_t \quad (15)$$

$$I R_t \leq D_t \quad (16)$$

در روابط فوق S_{\min} و S_{\max} = به ترتیب حجم ذخیره‌ی کمینه و بیشینه، E_t = شدت تولید انرژی الکتریکی، p_{\max} = ظرفیت تولید مولدها بر حسب مگاوات ساعت، G_t = آب اضافی از سرریز سد و $I R_t$ = آب تخلیه‌شده جهت مقادیر موردنیاز آبیاری. چون

ازای BW_M هایی است که مقدار آن به‌اندازه $\frac{BW_M}{10}$ از BW_M کوچک‌تر است.

الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات بر اساس سرعت و مکان ذرات تعریف می‌گردد. نخست، حل‌های اولیه بر اساس حالت تصادفی تعریف می‌گردند و سپس عملیات بهینه‌سازی شروع می‌گردد (ریچاردسون، ۲۰۰۸). این الگوریتم بهترین پاسخ‌ها را بر اساس حرکت گروهی بهترین ذرات و با روش هوش مصنوعی پیدا می‌کند. فضایی را با D بعد و m ذره در نظر بگیرد. حال بردار موقعیت ذرات بر اساس رابطه‌ی نظیر $X_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ تعریف می‌گردد. موقعیت ذرات در حقیقت می‌تواند همان راه-حل‌های مسئله باشد. تابع هدف بر اساس موقعیت ذرات محاسبه می‌گردد. اگر فرض شود که مسئله‌ی موردنظر بیشینه‌سازی باشد، آنگاه چنانچه تابع هدف بزرگ‌تر بود، در نتیجه X_i بهتر است. هر ذره دارای ویژگی‌های مشخصی است که می‌تواند در فضای جستجو بر اساس $V_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}$ بهترین موقعیت ذرات بر اساس مجموعه‌ی بهینه‌ی محلی به‌صورت $P_i = p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}$ و بر اساس مجموعه‌ی بهینه مطلق با رابطه‌ی دیگری نظیر $P_g = p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn}$ تعریف می‌گردد.

$$V_{i,k+1} = w V_{i,k} + \frac{c_1 r_1 (P_i - X_{i,k})}{\Delta t} + \frac{c_2 r_2 (P_g - X_{i,k})}{\Delta t} \quad (9)$$

$$X_{i,k+1} = X_{i,k} + V_{i,k} \Delta t \quad (10)$$

که k = شمارگان تکرار، w = ضریب اینرسی، c_1 و c_2 = نرخ یادگیری و r_1 و r_2 = نرخ یادگیری. مراحل الگوریتم هیبریدی:

۱. در گام نخست، موقعیت تصادفی و سرعت تصادفی ذرات تعریف می‌گردد.

۲. در این مرحله، پارامترهای $HMCR$ ، PAR و HMS تعریف می‌گردند.

۳. مقادیر تابع هدف برای ذرات مرحله‌ی اول محاسبه می‌شود.

۴. مقدار HM برای هر ذره به‌روزرسانی شده و مقادیر راهنمای محلی و مطلق تعیین می‌گردند. به عبارتی، در این مرحله، حافظه به‌روزرسانی می‌شود.

۵. در این مرحله، موقعیت و سرعت ذرات بر اساس معادلات ۹ و ۱۰ به‌روزرسانی می‌گردد.

در جدول ۲، مقایسه‌ی سه روش ازدحام ذرات، هارمونی و روش هیبریدی به کار گرفته شده در این تحقیق دیده می‌شود. در روش هیبریدی، مقدار تابع هدف نسبت به روش ازدحام ذرات به مقدار ۲۸٪ و نسبت به روش هارمونی به مقدار ۱۴٪ کاهش یافته است که با توجه به هدف مسئله، یعنی کمینه‌سازی تابع هدف، این موضوع مطلوب است. این مطلب مشخص می‌کند که روش هیبریدی عملکرد مناسب‌تری برای کاهش تابع هدف داشته است. همچنین، در بخش زمان محاسبات، روش هیبریدی نسبت به روش ازدحام ذرات ۳۷٪ و نسبت به روش هارمونی ۳۴٪ کاهش یافته است. همچنین، مقادیر مربوط به انحراف معیار و ضریب تغییرات در این روش از دو روش دیگر کمتر است که نشانگر عملکرد بهتر این روش نسبت به سایر روش‌ها است. در جدول ۳ مشاهده می‌گردد که میانگین تابع هدف به ازای جمعیت‌های مختلف محاسبه شده که روش هیبریدی از جمعیت ۱۰۰ تا ۴۰۰ در محاسبه تابع هدف، اختلاف زیادی بین مقادیر از خود نشان نداده است. لذا، می‌توان با یک جمعیت کمتر، نسبت به سایر روش‌ها، با توجه به اینکه مقدار تابع هدف در سایر روش‌ها از ۱۰۰ تا ۴۰۰ اختلاف قابل توجهی دارد، محاسبات را انجام داد. همچنین، تعداد دفعات تکرار برای روش هارمونی در جهت دستیابی به پاسخ بهینه مطلق مسئله با روش ازدحام ذرات و هیبریدی برابر است.

مسئله مقید است و الگوریتم به کاررفته نامقید است، لذا جریمه^۱ به تابع هدف به شکل زیر اضافه می‌گردد:

$$P = R_p \sum_{i=1}^{nc} \left[\frac{g_i}{g_j} - 1, 0 \right] + R_p \sum_{i=1}^{nc} \left[1 - \frac{g_j}{g_i}, 0 \right] \quad (17)$$

$$\phi = f + P \quad (18)$$

که در آن f = تابع هدف اولیه، P = جریمه، g_i و g_j = عبارات طرفین قیود نامساوی و ϕ = تابع هدف بعد از اعمال جریمه.

ارائه نتایج

موقعیت منطقه در شکل (۱) نشان داده شده است. جدول (۱) حاوی اطلاعات هیدرولوژیک منطقه است. حوضه آبخیز مهاباد در شمال غرب ایران واقع شده و مساحت کل حوضه ۸۰۷ کیلومترمربع است. این سیستم، شامل سد مخزنی مهاباد در یک کیلومتری شهر مهاباد و دارای سد انحرافی در پایین دست است. سد مهاباد برای تأمین آب شرب، کشاورزی، کنترل سیلاب‌های فصلی و تأمین انرژی برق آبی احداث شده است.



شکل (۱): موقعیت سد مهاباد (صابر چناری^۱ و همکاران، ۱۳۹۰)

جدول (۱): اطلاعات هیدرولوژیک مخزن

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
ورودی (میلیون مترمکعب)	۲۰/۶۷	۹/۱۱	۱/۵۳	۱/۴۳	۱/۴	۱/۴۴	۶/۹۲	۲۷/۰۴	۳۳/۰۱	۲۹/۶۴	۳/۴۷	۲۶/۸
ورودی به نیروگاه (میلیون مترمکعب)	۵۱/۸۴	۵۱/۸۴	۵۱/۸۴	۵۱/۸۴	۵۱/۸۴	۵۱/۸۴	۵۳/۵۷	۵۳/۵۷	۵۳/۵۷	۵۳/۵۷	۵۳/۵۷	۵۳/۵۷
ارتفاع تخیر (میلی متر)	۱۲۰/۵	۴۰/۷۷	۳۰/۲۵	۲۲/۷۸	۳۴/۲۵	۳۶/۱۲	۵۰/۸۸	۱۵۶/۳۹	۲۷۴/۹۱	۳۲۱/۵۲	۳۱۴/۳	۲۴۲/۵

¹ Penalty

جدول (۲): مقایسه‌ی نتایج روش‌های مختلف برای تابع هدف مثال مخزن سد مهاباد

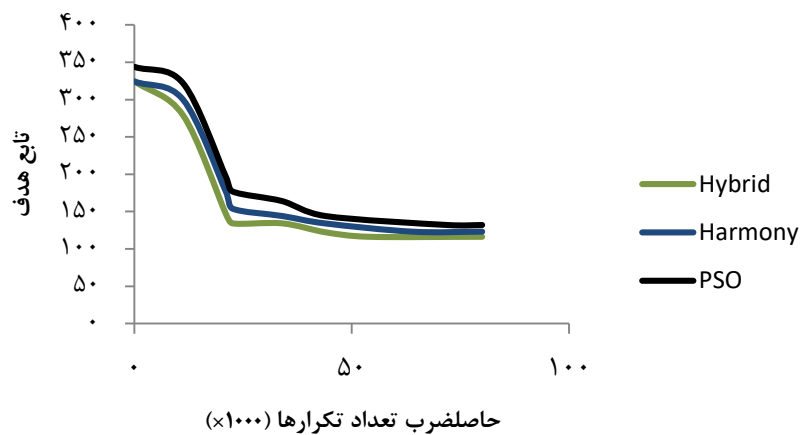
شماره‌ی اجرا	روش ازدحام ذرات	روش هارمونیک	روش هیبریدی
۱	۱۷۴/۲۳	۱۳۵/۱۲	۱۱۷/۱۲
۲	۱۶۵/۶۹	۱۴۹/۲۳	۱۱۸/۲۳
۳	۱۷۲/۲۳	۱۴۵/۱۲	۱۱۶/۶۲
۴	۱۶۷/۴۳	۱۳۹/۴۳	۱۱۹/۴۳
۵	۱۳۸/۴۷	۱۲۸/۵۱	۱۱۹/۱۲
میانگین جواب‌ها	۱۶۳/۶۱	۱۳۷/۶۴	۱۱۸/۰۴
بدترین جواب	۱۷۴/۲۳	۱۴۹/۲۳	۱۱۹/۴۳
بهترین جواب	۱۳۸/۴۷	۱۳۵/۱۲	۱۱۷/۱۲
انحراف معیار	۱۴/۵۸	۱۱/۲۲	۰/۶۲
ضریب تغییرات	۲/۹۱	۲/۲۴۴	۰
زمان مربوط به محاسبه‌ی تابع هدف (ثانیه)	۴/۷۹	۴/۶	۳/۰۱
جواب بهینه‌ی مطلق مسئله بر اساس نرم‌افزار لینگو ۱۰	۱۱۸/۲۵		

جدول (۳): محاسبه‌ی تابع هدف برای روش‌های مختلف با اندازه‌های مختلف جمعیت

روش	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
هارمونی	۱۴۶/۷۶	۱۴۲/۱۳	۱۳۹/۲۳	۱۳۷/۶۴
ازدحام ذرات	۱۷۰/۹۴	۱۶۸/۱۲	۱۶۷/۲۳	۱۶۳/۶۱
هیبریدی	۱۱۷/۹۹	۱۱۷/۹۶	۱۱۷/۹۳	۱۱۷/۸

روش هیبریدی، مقدار همگرایی پس از ۵۴۰۰۰ تکرار رخ می‌دهد. این در حالی است که همگرایی در روش ازدحام ذرات پس از ۷۲۰۰۰ تکرار و در روش هارمونی پس از ۶۴۰۰۰ تکرار رخ می‌دهد.

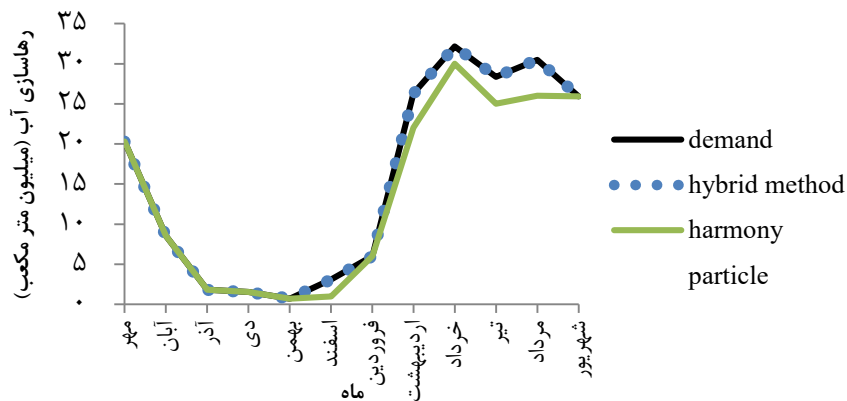
همچنین، نحوه‌ی همگرایی تابع هدف در شکل (۲) نمایش داده شده است. به‌وضوح مشخص است که تابع هدف در روش هیبریدی مقدار کمتری دارد که این مطلوب مسئله است. در



شکل (۲): ارزیابی روش‌های مختلف تعیین تابع هدف

است. مقدار انرژی تولیدشده در روش هیبریدی ۲۴۲۲۰/۵، در روش ازدحام ذرات ۲۲۸۰۸/۵ و در روش هارمونی ۲۳۶۴۴/۱۲ مگاوات ساعت است. در شکل (۴)، مقادیر انرژی تولیدشده توسط مدل با مقادیر بهره‌برداری مقایسه شده است و به‌وضوح مشخص است روش هیبریدی انرژی لازم را در تمامی ماه‌ها تأمین نموده است. درحالی‌که دو روش دیگر به شکل کامل موفق نبوده‌اند.

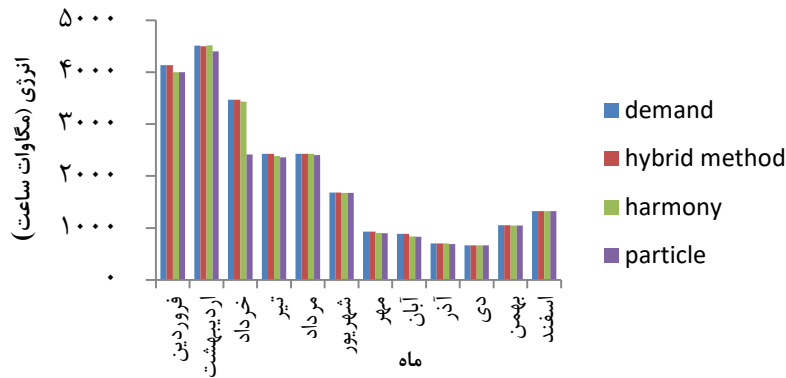
در شکل (۳) مقادیر رهاسازی آب و مقادیر نیاز ارائه شده است. در روش هیبریدی، انطباق خوبی بین مقادیر نیاز و مقادیر رهاسازی آب وجود دارد. درحالی‌که در دو روش دیگر در برخی از ماه‌ها کمبود دیده می‌شود. مشاهده می‌شود که در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد در روش‌های ازدحام ذرات و هارمونی مقادیر رهاسازی از مقادیر موردنیاز کمتر هستند. در جدول (۴)، مقادیر انرژی تولیدشده در نیروگاه محاسبه شده است. مجموع انرژی روش هیبریدی از دو روش دیگر (برحسب مگاوات ساعت) بیشتر است و لذا روش موردنظر مطلوب‌تر



شکل (۳): مقادیر رهاسازی آب در روش‌های مختلف

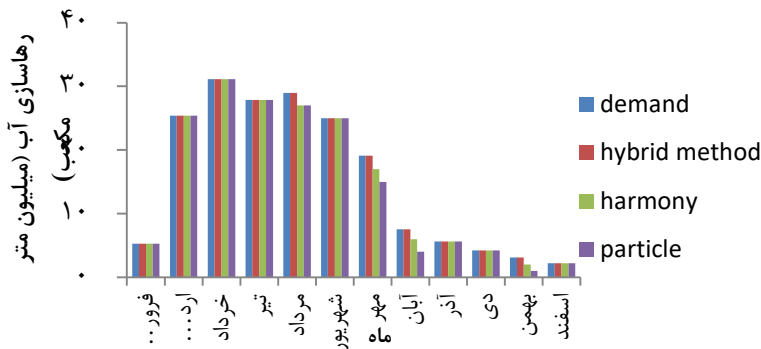
جدول (۴): مقادیر انرژی تولیدشده برای نیروگاه

ماه	هیبریدی- مگاوات ساعت	ازدحام ذرات- مگاوات ساعت	هارمونی- مگاوات ساعت
فروردین	۴۱۳۶	۴۰۰۱/۱۲	۴۰۰۱/۳۵
اردیبهشت	۴۵۱۶	۴۴۰۰/۱۲	۴۵۴۴/۲۶
خرداد	۳۴۶۸/۱۲	۲۴۱۲/۴۹	۳۴۳۴/۰
تیر	۲۴۲۹/۳۴	۲۳۵۷/۴۳	۲۳۸۷/۰
مرداد	۲۴۲۸/۴۳	۲۴۰۰/۱۲	۲۴۲۵
شهریور	۱۶۸۲/۳۳	۱۵۹۹/۲۱	۱۶۷۷/۰۱
مهر	۹۳۲/۰۱	۹۰۰/۲۵	۹۰۲/۱۲
آبان	۸۸۴/۱۴	۸۳۵	۸۶۵/۲۳
آذر	۶۹۹/۱۲	۶۸۹	۶۸۹
دی	۶۶۵/۳۴	۶۶۲/۲۵	۶۶۲/۱۱
بهمن	۱۰۵۷/۴۳	۱۰۴۹/۱۲	۱۰۴۹/۱۲
اسفند	۱۳۲۲/۳۴	۱۳۱۰/۰۱	۱۳۱۲/۲۴
مجموع	۲۴۲۲۰/۵	۲۲۸۰۸/۵	۲۳۶۴۴/۱۲



شکل (۴): مقایسه‌ی مقادیر مورد نیاز انرژی با روش‌های مختلف

در شکل (۵)، مقایسه‌ی مقادیر تقاضا برای آبیاری و مقادیر نتایج نشان‌دهنده آن است که روش هیبریدی در تمامی ماه‌ها شبیه‌سازی شده در روش‌های مختلف صورت گرفته است که توانسته نیاز آبیاری را به‌خوبی تأمین نماید.



شکل (۵): مقایسه‌ی مقادیر تقاضا و به‌دست آمده از مدل‌ها برای نیاز آبیاری

مترمکعب در زمان t و $loss_t^i$ = مقدار تلفات در زمان t که بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$loss_t^i = EV_t^i \cdot \frac{A_t + A_{t+1}}{2} \quad (21)$$

که EV_t^i = مقدار عمق تبخیر خالص در دوره‌ی t ، A_t = مساحت مخزن در ابتدای دوره‌ی زمانی t و A_{t+1} = مساحت مخزن در دوره‌ی $t+1$.

همچنین، نظیر مسئله‌ی سد مخزن مهاباد، معادله‌ی ۱۳ برقرار است. علاوه بر آن، مقادیر رهاسازی مخزن باید بین مقادیر بیشینه و کمینه رهاسازی قرار گیرد. اگر دو معادله‌ی مذکور برقرار نباشند، تابع جریمه به تابع هدف اضافه می‌گردد. مقدار برق تولیدشده در نیروگاه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$P_t = \min \left[\left(\frac{g \times \eta \times R_t}{PF} \right) \times \left(\frac{h_t}{1000} \right), PC \right] \quad (22)$$

$$h_t = \left(\frac{H_t + H_{t+1}}{2} \right) - TWL \quad (23)$$

در روابط فوق g = شتاب جاذبه، η = ضریب مربوط به بازده نیروگاه، PF = ضریب نیروگاه، R_t = مقدار رهاسازی آب برحسب میلیون مترمکعب، PC = ظرفیت نصب نیروگاه،

مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن کارون ۴

مدل بهینه‌سازی مخزن کارون ۴ با هدف افزایش تولید انرژی یا کاهش کمبودها در نظر گرفته می‌شود. کمینه ظرفیت مخزن ۱۱۴۱ میلیون مترمکعب و بیشینه ظرفیت مخزن ۲۱۹۰ میلیون مترمکعب است و طول دوره‌ی مطالعاتی شامل ۵ سال است. تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } D = \sum_{t=1}^T \left[1 - \frac{P(t)}{P(c)} \right] \quad (19)$$

که $P(t)$ مقدار برق تولیدشده در نیروگاه و $P(c)$ ظرفیت نصب نیروگاه است. همچنین، رابطه‌ی پیوستگی به‌قرار زیر است:

$$S_{t+1}^i = S_t^i + Q_t^i + R_t^i - loss_t^i \quad (20)$$

در رابطه فوق S_{t+1}^i = ذخیره در زمان $t+1$ برحسب میلیون مترمکعب، S_t^i = مقدار ذخیره در زمان t برحسب میلیون مترمکعب، Q_t^i = مقدار ورودی در زمان t برحسب میلیون مترمکعب، R_t^i = مقدار رهاسازی آب برحسب میلیون

است که روش هیبریدی دارای مقادیر ضریب تغییرات کمتری است. همچنین، پاسخ بهینه‌ی مطلق مسئله با استفاده از نرم‌افزار لینگو نسخه ۱۰ مقدار ۱/۲۱۶ است. میانگین پاسخ‌های روش هیبریدی به پاسخ بهینه‌ی مطلق مسئله نزدیک‌تر است. در شکل (۶) نحوه‌ی همگرایی پاسخ-ها نشان داده شده است و مشخص است که روش هیبریدی سریع‌تر همگرا شده است.

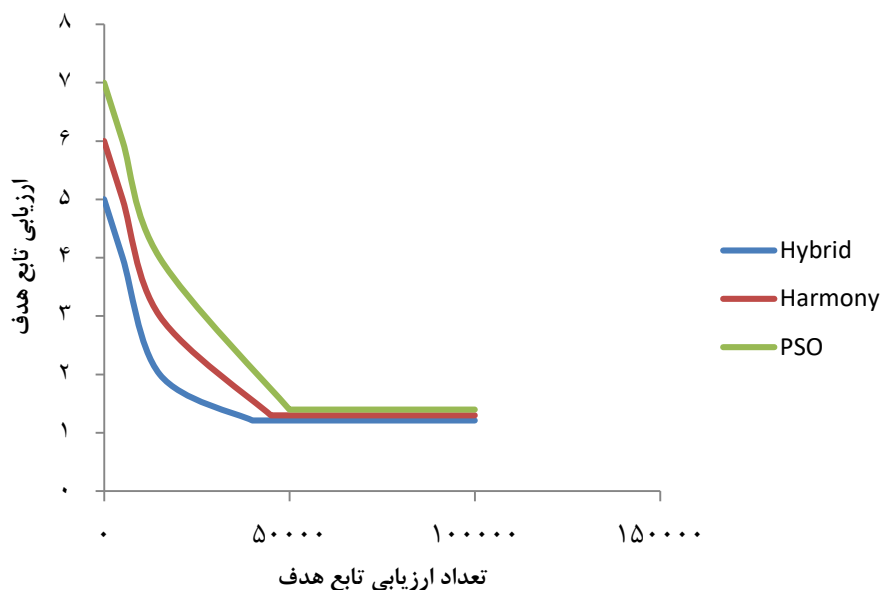
$TWL =$ رقوم سطح آب پایین‌دست، $H_t =$ ارتفاع آب در مخزن در زمان t ، $H_{t+1} =$ ارتفاع آب در مخزن در زمان $t+1$ و $H_t =$ بار هیدرولیکی مؤثر. جواب بهینه‌ی مطلق مسئله بر اساس نرم‌افزار لینگو نسخه ۱۰ و روش غیرخطی به دست آمده است.

نتایج مخزن کارون ۴

جدول (۵) حاوی اطلاعات ۱۰ اجرای سه روش هارمونی، ازدحام ذرات و روش هیبریدی است. نتایج نشان‌دهنده آن

جدول (۵): مقایسه‌ی ۱۰ اجرای مختلف روش‌های هیبریدی، هارمونی و ازدحام ذرات

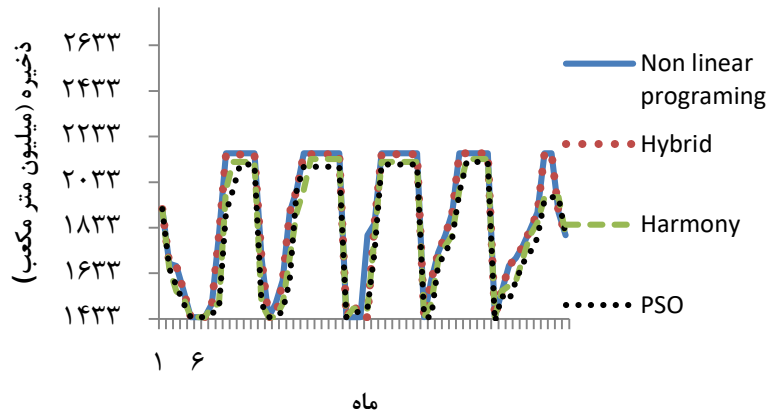
شماره‌ی اجرا	روش هیبریدی	روش هارمونی	روش ازدحام ذرات
۱	۱/۲۱۶	۱/۲۲۴	۱/۲۲۵
۲	۱/۲۱۵	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
۳	۱/۲۱۶	۱/۲۳۵	۱/۲۲۳
۴	۱/۲۱۵	۱/۲۱۸	۱/۲۳۶
۵	۱/۲۱۶	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
۶	۱/۲۱۵	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
۷	۱/۲۱۷	۱/۲۱۸	۱/۲۱۹
۸	۱/۲۱۶	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
۹	۱/۲۱۶	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
۱۰	۱/۲۱۶	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
بدترین پاسخ	۱/۲۱۷	۱/۲۳۵	۱/۲۳۶
بهترین پاسخ	۱/۲۱۵	۱/۲۱۸	۱/۲۱۸
میانگین پاسخ‌ها	۱/۲۱۵	۱/۲۲۰	۱/۲۲۱
ضریب تغییرات	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۵۱
جواب بهینه‌ی مطلق	۱/۲۱۶		



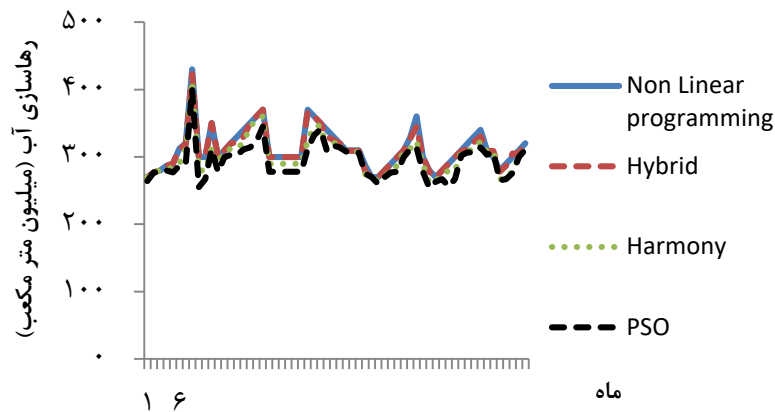
شکل (۶): نحوه‌ی همگرایی روش‌های مختلف برای بهینه‌سازی مخزن کارون ۴

با روش برنامه‌ریزی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار لینگو مقایسه شده است. نتایج گویای نزدیکی روش برنامه‌ریزی غیرخطی با روش هیبریدی است.

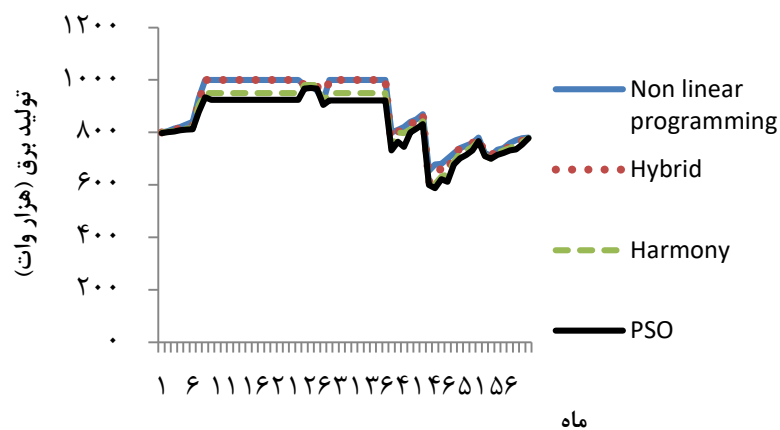
همچنین، در شکل‌های (۷) تا (۹) مقادیر ذخیره و رهاسازی و رهاسازی آب و برق تولیدشده در نیروگاه سد کارون ۴ مشاهده می‌شود. نتایج روش‌های هیبریدی، هارمونی و ازدحام ذرات



شکل (۷): مقادیر ذخیره آب برای مخزن کارون ۴



شکل (۸): مقادیر رهاسازی آب برای مخزن کارون ۴



شکل (۹): مقادیر برق تولیدشده در نیروگاه

“Estimation of Muskingum parameter by meta-heuristic algorithms.” Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management. 166(6), 315-324.

4- Malakooti, B., Kim, H., and Sheikh, S. (2012). “Bat-intelligence search with application to multi-objective optimization.” International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 60(9-12), 1071-1086.

5- Rashid, K. A. and Diacon, A. L. (2007). “Optimal operation of large hydropower reservoirs with unregulated inflows.” U.P.B Scientific Bulletin, Ser. C. 69(2), 25-36.

6- Richardson, P. (2008). Bats. Natural History Museum, London.

7- Baziar, A. and Kavooosi-fard, A. (2013). “A novel self-adaptive modification approach based on bat algorithm for optimal management of renewable MG.” Journal of Intelligent Learning Systems and Applications. 5(1), 11-18.

8- Deep, K. and Bansal, J. C. (2009). “Mean particle swarm optimization for function optimization.” International Journal of Computational Intelligence Studies. 1(1), 72-92.

9- Fallah-Mehdipour, E., Bozorg-Haddad, O., Beygi, S., and Mariño, M. A. (2011). “Effect of utility function curvature of Young’s bargaining method on the design of WDNs.” Water Resources Management. 25(9), 2197-2218.

10- Geem, Z. W. and Kim, G. V. (2001). “A new heuristic optimization algorithm: Harmony search.” SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. 76(2), 68-80.

11- Reddy, V. U. and Manoj, A. (2012). “Optimal capacitor placement for loss reduction in distribution systems using bat algorithm.” IOSR Journal of Engineering. 2(10), 23-27.

نتیجه گیری

در این تحقیق، از روش هیبریدی ازدحام ذرات و هارمونی استفاده شد. روش مذکور قابلیت حل مشکل عدم تعادل میان قابلیت پویا و ارتفاع در روش ازدحام ذرات را دارد و همچنین رفتار مناسبی را با ذراتی که خارج از فضای منطقی در روش ازدحام ذرات تعریف می‌گردند، شکل می‌دهد. برای بررسی قابلیت روش مذکور، دو مسئله بهره‌برداری از مخازن سدهای مهاباد و کارون ۴ در نظر گرفته شد. در مسئله اول، پاسخ بهینه‌ی مطلق مسئله ۱۱۸/۲۵ بر اساس نرم‌افزار لینگو و روش برنامه‌ریزی غیرخطی محاسبه گردید که با پاسخ روش هیبریدی که مقدار ۱۱۸/۰۴ بود، انطباق خوبی داشت. همچنین، روش هیبریدی با تولید ۲۴۲۲۰/۵ مگاوات برق نسبت به دو روش هارمونی و ازدحام ذرات، برق بیشتری در نیروگاه مربوط به سد مذکور تولید نموده است. در مسئله مربوط به مخزن کارون ۴، پاسخ بهینه‌ی مطلق مسئله بر اساس نرم‌افزار لینگو و روش برنامه‌ریزی غیرخطی مقدار ۱/۲۱۶ محاسبه گردیده است که با میانگین پاسخ روش هیبریدی که ۱/۲۱۵ است، انطباق قابل توجهی دارد. ضریب تغییرات در روش هیبریدی نسبت به سایر روش‌ها مقدار کمتری دارد. علاوه بر آن، نتایج مربوط به میزان رهاسازی آب، تولید برق و ذخیره‌ی آب در سد مذکور در روش هیبریدی با روش برنامه‌ریزی غیرخطی حاصل از نرم‌افزار لینگو انطباق قابل توجهی دارد. لذا، روش هیبریدی مورداستفاده در این تحقیق قابلیت مناسبی برای حل مسائل مربوط به مدیریت منابع آب و بهره‌برداری از مخازن دارد.

مراجع

۱- صابر چناری، ک.، عبقری، ه.، عرفانیان، م. و قلیزاده، س. ۱۳۹۱. ارائه‌ی مدل کوتاه‌مدت بهره‌برداری بهینه از منابع آب با استفاده از الگوریتم جامعه ذرات و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک. فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری، ۹۷: ۶۳-۷۲.

2- Niknam, T., Sharifinia, S., and Azizipanah-Abarghooee, R. (2013). “A new enhanced bat-inspired algorithm for finding linear supply function equilibrium of GENCOs in the competitive electricity market.” Energy Conversion and Management. 76(2013), 1015-1028.

3- Orouji, H., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E., and Mariño, M. A. (2013).

A Hybrid Method for Optimization of Dam-Reservoir Operation Based on Artificial Intelligence

Mohammad Ehteram^{*1}
Sayed-Farhad Mousavi²
Hojat Karami³
Newsha Tehrani⁴
Idin Amiri⁵

Abstract

Dam reservoirs are considered as important hydraulic structures in water resources management and flood control. Therefore, reservoir operation and method of water release are of high importance. In this study, a new algorithm is used for reservoirs operation. This algorithm is a combination of Harmony Algorithm and Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, and supports these two algorithms such that it solves the problem of lack of balance between exploration and exploitation. This hybrid method improves the harmony method so that the trap probability in local optimum is decreased. Moreover, the harmony method would help to correct the responses which are not in feasible space of the solution in PSO method. The hybrid method was used for Mahabad and Karun 4 dam reservoirs, aiming at reducing the shortages and/or enhancing hydropower generation. Results showed that the hybrid method has closer responses to global optimum, as compared to the other two methods. In addition, simulated results of water release, storage, and generated power in Mahabad and Karun 4 reservoirs match very well to nonlinear-programming results obtained by using Lingo software.

Keywords

Optimization, Dam reservoir, PSO, Harmony algorithm.

1*. PhD candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, eh.mohammad@yahoo.com.

2. Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan.

3. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

4. PhD candidate, Faculty of Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

5. PhD candidate, Imperial College, London, UK.