

ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی هارمونی در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه و تک‌مخزنه واقعی (مطالعه موردی: سد دز)

مریم میربیک سبزواری^۱، حسن ترابی‌پوده^{۲*} و حجت‌الله یونسی^۳

چکیده

بهره‌برداری بهینه از مخازن، یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع آب سطحی است و روش‌های بهینه‌سازی مختلفی در این زمینه استفاده شده‌اند که پرکاربردترین آنها، الگوریتم‌های فراکاوشی هستند. در تحقیق حاضر، الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) برای تعیین بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار بهینه مطلق با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی (لینگو) به دست آمد. HSA، ابتدا برای بهینه‌سازی یک سیستم چهار مخزنه به کار گرفته شد. مقدار تابع هدف با استفاده از لینگو برابر ۳۰۸/۲۹۱۵ و با استفاده از HSA برابر ۳۰۸/۲۹۰۰ محاسبه شد که ۰/۰۰۰۵ درصد با بهینه مطلق اختلاف داشت. پس از موفقیت الگوریتم HS در حل سیستم چهار مخزنه، یک سیستم ده مخزنه در نظر گرفته شد. مقدار تابع هدف با استفاده از لینگو برابر ۱۱۹۴/۴ و با استفاده از HSA برابر ۱۱۹۳/۱ محاسبه شد که ۰/۱ درصد با بهینه مطلق اختلاف داشت. پس از موفقیت الگوریتم در حل مسائل چند مخزنه، بهره‌برداری از مخزن سد دز برای یک دوره میان‌مدت (۱۰ سال آماری) مدنظر قرار گرفت که جواب الگوریتم ۱/۳۱٪ با جواب بهینه مطلق اختلاف داشت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این الگوریتم توانایی حل مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های واقعی را نیز دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی هارمونی، الگوریتم فراکاوشی، برنامه‌ریزی خطی، بهره‌برداری چند مخزنه، بهینه‌سازی.

ارجاع: ترابی‌پوده ح. میربیک سبزواری م. و یونسی ح. ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی هارمونی در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چند مخزنه و تک‌مخزنه واقعی (مطالعه موردی: سد دز). مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۲۷-۳۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد.

* نویسنده مسئول: torabi1976@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

مقدمه

افزایش جمعیت، کاهش کمی و کیفی منابع آب و عدم توزیع یکنواخت منابع موجود، از جمله مسائل هشداردهنده‌ای هستند که سیاستمداران، برنامه‌ریزان و متخصصان را به چاره‌اندیشی برای استفاده بهینه از منابع آب سوق می‌دهد. فرایند تصمیم‌گیری در بهره‌برداری از مخازن تحت تأثیر اهداف فراوانی است و عموماً بسیاری از این اهداف با یکدیگر نامتناسب هستند. از آنجا که جریان‌های ورودی به مخزن و حجم‌های ذخیره دارای عدم قطعیت هستند، چالش اصلی تعیین بهترین رهاسازی مخزن و بهینه‌سازی هیدروسیستم‌هاست. به دلیل پیچیدگی‌ها و مشکلات مختلف در حل مسائل بهینه‌سازی، تلاش‌های گسترده‌ای برای استفاده از الگوریتم‌های مختلف در این زمینه صورت گرفته است. بزرگ حداد (۱۳۸۴) از الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل^۱ (HBMO) در بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها از جمله بهره‌برداری سیستم تک مخزنه استفاده کرد. الگوریتم جستجوی هارمونی^۲ (HSA) در مسائل بهینه‌سازی عملی، نظیر بهینه‌سازی ساختاری، تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام، طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب، مسیریابی، طراحی اسکلت‌های فلزی، مدل‌های انتقال انرژی، زمان‌بندی و ... به کار رفته است (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷؛ لی و گیم، ۲۰۰۵). الگوریتم ژنتیک توسعه یافته برای سیاست بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه به کار گرفته شد و پس از مقایسه^۳ نتایج آن با روش برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته^۳ (DDDP) برتری الگوریتم ژنتیک مشخص شد (واردلاو و شریف، ۱۹۹۹). الگوریتم مورچگان نیز برای بهره‌برداری از یک سیستم چهارمخزنه در فضای تصمیم گسسته به کار گرفته شد که توانست با دقت بیشتر و در زمان محاسبات کمتری نسبت به الگوریتم ژنتیک مسئله را بهینه‌سازی کند (جلالی و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین، بهینه‌سازی ازدحام ذرات مقید در مطالعه‌ای دیگر بررسی شد. در این مطالعه، روش‌های پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم PSO، نتایج بهتری را ارائه کردند و بهترین نتیجه برای حالتی که رهاسازی به‌عنوان متغیر تصمیم انتخاب شد، به‌دست آمد.

این روش‌ها نسبت به جمعیت اولیه و اندازه آن حساس نیستند و از سرعت همگرایی بالایی برخوردارند (افشار، ۲۰۱۳). لین و همکاران (۲۰۱۶)، الگوریتم جستجوی هارمونی چندجمعیتی را برای گسترش طول عمر شبکه‌های سنسور صوتی آب زیرزمینی به کار بردند. نتایج، عملکرد بالای الگوریتم را در رابطه با گسترش طول عمر شبکه، قدرت و زمان محاسبات نشان داد. موسوی و همکاران (۲۰۱۷)، الگوریتم جستجوی هارمونی را برای بهینه‌سازی پروژه‌های ذخیره‌سازی نیروگاه‌های آبی به کار گرفتند و نتایج رضایت‌بخشی گزارش شد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی توانایی الگوریتم جستجوی هارمونی در حل مسئله بهره‌برداری مسائل چند مخزنه و با تعداد زیاد متغیرهای تصمیم از این الگوریتم به‌منظور بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چهارمخزنه و ده‌مخزنه استفاده خواهد شد. تاکنون الگوریتم جستجوی هارمونی برای حل مسئله ده‌مخزنه به کار گرفته نشده است که در تحقیق حاضر، این کار صورت گرفت. سپس، برای ارزیابی توانایی الگوریتم در حل مسائل واقعی، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز واقع در استان خوزستان برای ده سال آماری (۲۰۰۰-۱۹۹۰) با ۱۲۰ ماه در نظر گرفته شده است. در مسئله تک‌مخزنه سد دز، هدف تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست و یا به‌عبارتی تعیین بهینه‌ترین رهاسازی ماهانه برای ۱۰ سال بهره‌برداری است. در هر سه مسئله، میزان رهاسازی از مخازن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. سپس، شرح الگوریتم HS به همراه تمامی روابط موجود ارائه شده و در ادامه از آنالیز حساسیت برای یافتن مقادیر بهینه پارامترها استفاده می‌شود. نتایج بهینه مطلق تابع هدف برای هر دو مسئله چهارمخزنه و ده‌مخزنه ماهیتی خطی و برای مسئله تک‌مخزنه سد دز ماهیت غیرخطی داشت و توسط نرم‌افزار لینگو^۴ که یک مدل برنامه‌ریزی خطی است و توانایی حل مدل‌های غیرخطی را نیز داراست، محاسبه شده است و در ادامه نتایج الگوریتم HS با لینگو مقایسه خواهد شد.

مواد و روش‌ها

شرح مسئله چهارمخزنه و ده‌مخزنه

در تحقیق حاضر، ابتدا سیستم چهارمخزنه شکل ۱ بهینه می‌شود. این مسئله توسط چو و کورتس (۱۹۷۴) مطرح

1- Honey Bees Mating Optimization (HBMO)

2- Harmony Search Algorithm (HSA)

3- Discrete Differential Dynamic Programming (DDDP)

4- Lingo

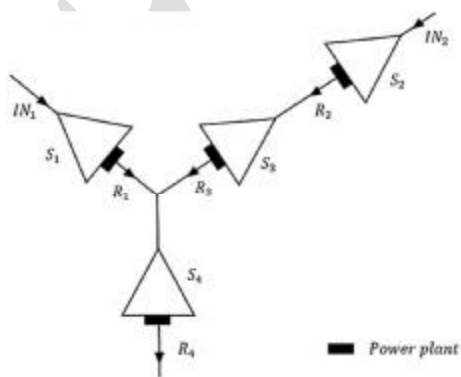
$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

تابع هدف سیستم چهارمخزنه و ده مخزنه در جدول ۱ نشان داده شده و هدف از آن ماکزیم سازی مقدار تابع بر اساس رهاسازی بهینه است. برای جلوگیری از ورود جواب‌های نشدنی به مسئله، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است و یکی از این روش‌ها، استفاده از توابع جریمه است (میچالویز و چوئوری، ۱۹۹۶). میزان تابع جریمه به صورت معادله (۴) به تابع هدف افزوده می‌شود:

$$P = C \cdot \Delta^n \quad (۴)$$

که در آن P ، میزان جریمه؛ Δ ، میزان تخطی از قید؛ و C و n پارامترهای تابع جریمه هستند که توسط کاربر و با توجه به مسئله انتخاب می‌شوند (واردلاو و شریف، ۱۹۹۹). در تحقیق حاضر، ضریب C برابر با ۴۰ و n هم به منظور جلوگیری از کوچک شدن جریمه‌های کمتر از یک، ۱ در نظر گرفته می‌شوند. روابط تابع جریمه مربوط به رهاسازی و حجم مخزن نیز در جدول ۱ آورده شده است. چون هدف ماکزیم سازی تابع است، پس مقدار تابع جریمه باید از تابع هدف کم شود.

در جدول ۱، روابط I برای مسئله چهارمخزنه و معادلات II برای مسئله ده مخزنه هستند. $b_{(i,j)}$ ، ضرایب سود است که مقادیر آنها توسط چو و کورتس (۱۹۷۴) برای مسئله چهارمخزنه و توسط موری و یاکوویتز (۱۹۷۹) برای مسئله ده مخزنه ارائه شده است. S^{\max} و S^{\min} ، به ترتیب حجم مخزن حداقل و حداکثر؛ و R^{\max} و R^{\min} ، به ترتیب رهاسازی حداقل و حداکثر از مخزن هستند.



شکل ۱- سیستم چهارمخزنه (چو و کورتس، ۱۹۷۴)

شده است که ایده اصلی آن، از سیستم چهارمخزنه معرفی شده توسط حیدری و همکاران (۱۹۷۱) گرفته شده است. در این سیستم، سود از استفاده آب برای آبیاری و تولید انرژی برقی به دست می‌آید. در سیستم چهارمخزنه، هدف تعیین عملکرد بهینه سیستم چهارمخزنه برای ۱۲ دوره زمانی است. سیستم ده مخزنه اولین بار توسط موری و یاکوویتز (۱۹۷۹) مطرح شد (شکل ۲). کل دوره زمانی در این مسئله ۱۲ دوره دو ساعته و متغیرهای تصمیم برابر ۱۲۰ است. در این مسئله، هدف از بهره‌برداری، حداکثر تولید انرژی در کل دوره است. در مسئله چهارمخزنه پارامترهای ورودی IN_1 و IN_2 به دو مخزن ۱ و ۲ وارد می‌شوند و مقادیر آنها توسط موری و یاکوویتز (۱۹۷۴) بیان شده است. حجم اولیه و نهایی برای مخازن ۱ تا ۳، برابر ۶ و برای مخزن ۴، برابر ۸ است. حداقل رهاسازی برای همه مخازن ۰/۰۰۵ و حداکثر آن برای مخزن ۱، برابر با ۴، مخزن ۲ و ۳ برابر با ۴/۵ و برای مخزن ۴ برابر با ۸ است. حداقل حجم مخزن برای کل مخازن در همه ۱۲ دوره برابر با ۱ بوده و حداکثر حجم مخازن نیز در رفرنس اصلی بیان شده است (موری و یاکوویتز، ۱۹۷۴). در مسئله ده مخزنه متغیر تصمیم، رهاسازی مخزن در هر دوره است. جریان رودخانه به مخازن ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ وارد می‌شود. قیود مسئله، حجم و رهاسازی حداقل و حداکثر برای هر یک از مخازن است. قید دیگر مربوط به حجم نهایی است که باید حجم نهایی و اولیه با هم برابر شوند. رابطه پیوستگی در هر مخزن (i) و در هر دوره (j) به شکل معادله (۱) برای هر دو مسئله تعریف شده است:

$$S_{(i,j+1)} = S_{(i,j)} + H_{(i,j)} + MR_{(i,j)} \begin{cases} i=1, \dots, 4; j=1, \dots, 12 & I \\ i=1, \dots, 10; j=1, \dots, 12 & II \end{cases} \quad (۱)$$

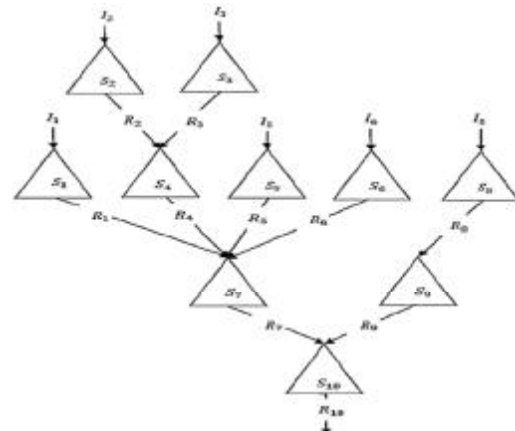
معادله (۱ - I) برای مسئله چهارمخزنه و معادله (۱ - II) برای مسئله ده مخزنه بیان شده است که S ، حجم مخزن؛ I ، جریان ورودی؛ و R ، رهاسازی ماهانه (میلیون مترمکعب)؛ و M ، ماتریس روابط مخزن است که به صورت معادله (۲) برای سیستم چهارمخزنه و معادله (۳) برای سیستم ده مخزنه نمایش داده می‌شوند:

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

همکاران، ۱۳۸۹). در جدول ۲ مشخصات فیزیکی سد دز آورده شده است. متوسط نیاز ماهانه کشاورزی پایین‌دست (تقاضا بر حسب میلیون مترمکعب) برای یک سال دوره آماری در جدول ۳ و میزان متوسط افت خالص ماهانه (تخیر منهای بارش) در جدول ۴ آورده شده است.

مدل بهره‌برداری از مخزن سد دز

مدل بهره‌برداری از مخزن که تابع هدف نامیده می‌شود، به‌صورت حداقل‌کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار رهاسازی از مقدار نیاز مخزن به بیشینه نیاز در طول دوره بهره‌برداری است که به‌صورت معادله اول در جدول ۵ بیان می‌شود (بزرگ حداد، ۱۳۸۴). سایر معادلات مخزن سد دز در جدول ۵ آورده شده است. توابع جریمه مربوط به حجم مخزن و رهاسازی نیز در جدول ۶ آورده شده است. در جدول ۶، ضرایب C_1 تا C_4 مربوط به تابع جریمه هستند که با توجه به مسئله، انتخاب خواهند شد. در بخش نتایج و بحث به مقادیر انتخاب شده برای آنها اشاره شده است.



شکل ۲- سیستم ده‌مخزنه (موری و یاکوویتز، ۱۹۷۹)

مطالعه موردی (سد دز)

سد دز، بلندترین سد دو قوسی ایران است که بر روی شاخه اصلی رودخانه دز و در ۱۰۰ کیلومتری بالادست محل اتصال دو رودخانه دز و کارون احداث شده است (برهانی داریان و مرتضوی نائینی، ۱۳۸۷). یکی از مصرف‌کنندگان عمده پایین‌دست سد دز، شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری است (جنت‌رستمی و

جدول ۱- روابط مربوط به سیستم چهارمخزنه و ده‌مخزنه (چو و کورتس، ۱۹۷۴؛ موری و یاکوویتز، ۱۹۷۹)

$\text{Max } I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} b_{(i,j)} \cdot R_{(i,j)} \begin{cases} n=4 & I \\ n=10 & II \end{cases}$	تابع هدف
$R_{(i,j)}^{\min} \leq R_{(i,j)} \leq R_{(i,j)}^{\max}; \quad j=1,2,\dots,12$	قید مربوط به رهاسازی
$S_{(i,j)}^{\min} \leq S_{(i,j)} \leq S_{(i,j)}^{\max}; \quad j=2,3,\dots,12$	قید مربوط به حجم مخزن
$P_{(i,j)} = \begin{cases} C_1 \cdot (1 - R_i / R_{\min})^n & \text{if } R_i < R_{\min} \\ C_1 \cdot (R_i / R_{\max} - 1)^n & \text{if } R_i > R_{\max} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$	توابع جریمه مربوط به رهاسازی
$P_{(i,j)} = \begin{cases} C_2 \cdot (1 - S_i / S_{\min})^n & \text{if } S_i < S_{\min} \\ C_2 \cdot (S_i / S_{\max} - 1)^n & \text{if } S_i > S_{\max} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$	توابع جریمه مربوط به حجم مخزن
$\text{Max } I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{12} ((b_{(i,j)} \cdot R_{(i,j)}) - P_{(i,j)}) \begin{cases} n=4 & I \\ n=10 & II \end{cases}$	تابع هدف نهایی

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مخزن سد دز (بزرگ حداد، ۱۳۸۴)

مشخصات مخزن	مقدار
مخزن	۵۹۰۰
متوسط جریان سالانه	۲۵۱۰
حجم مفید مخزن	۸۳۰
متوسط نیاز سالانه پایین‌دست	۲۳۴۰
حجم حداقل (مرده)	۲۱۲
ارتفاع از بی	۲۰۳
عرض تاج سرریز	۴/۵
وسعت مخزن در رقم حداکثر	۶۵
طول مخزن در رقم حداکثر	۶۴/۹

جدول ۳- نیاز متوسط ماهانه در پایین دست (MCM) (بزرگ حداد، ۱۳۸۴)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
نیاز	۵۱۶/۴	۶۰۳/۷	۷۵۷/۲	۸۳۱/۱	۸۱۸/۸	۷۰۶	۴۶۷/۶	۳۱۸	۱۶۳	۱۵۰/۱	۲۰۳	۳۶۵/۵

جدول ۴- میزان متوسط افت خالص ماهانه (تبخیر منهای بارش (mm) (بزرگ حداد، ۱۳۸۴)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
افت	۸۲/۴	۱۸۸/۵	۲۷۱/۹	۲۸۸/۷	۲۸۰	۲۷۳/۹	۱۱۵/۵	۹۳/۶	-۲/۹	-۳۶/۷	-۱۸/۸	۰/۹

جدول ۵- روابط مربوط به مخزن سد دز

عنوان	رابطه
تابع هدف	$Min TSD = \sum_{t=1}^{nt} \left(\frac{(R_t - D_t)}{D_{max}} \right)^2$
رابطه پیوستگی مخزن	$S(t) = S(t+1) - Q(t) + R(t) + L(t)$
قید رهاسازی	$R_{min}(t) \leq R(t) \leq R_{max}(t)$
قید حجم مخزن	$S_{min}(t) \leq S(t) \leq S_{max}(t)$
حجم اولیه مخزن	$S_1 = 830$
رابطه تبدیل حجم مخزن به سطح مخزن	$A(t) = 11.291 + 0.0157 \times S(t)$
TSD: تابع هدف	Q: جریان ورودی به مخزن در طول دوره (MCM)
D _t : مقدار نیاز در ماه t ام (MCM)	L: نمایانگر سرریز، تبخیر و دیگر افت‌های موجود
R(t): رهاسازی مخزن در ماه t ام (MCM)	R _{min} = ۰: رهاسازی حداقل (MCM)
D _{max} = ۸۳۱/۱: بیشترین نیاز ماهانه در طول دوره بهره‌برداری	R _{max} = ۱۰۰۰: رهاسازی حداکثر (MCM)
S(t): حجم مخزن در ابتدای دوره	S _{min} = ۸۳۰: حجم حداقل مخزن (MCM)
S(t+1): حجم مخزن در انتهای دوره	S _{max} = ۳۳۴۰: حجم حداکثر مخزن (MCM)

جدول ۶- توابع جریمه حجم مخزن و رهاسازی و تابع هدف نهایی مخزن سد دز

عنوان	رابطه
توابع جریمه مربوط به حجم مخزن	$P1 = \begin{cases} C1 \cdot (1 - S_i / S_{min}) & \text{if } S_i < S_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$
	$P2 = \begin{cases} C2 \cdot (S_i / S_{max} - 1) & \text{if } S_i > S_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$
توابع جریمه مربوط به رهاسازی	$P3 = \begin{cases} C3 \cdot (1 - R_i / R_{min}) & \text{if } R_i < R_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$
	$P4 = \begin{cases} C2 \cdot (R_i / R_{max} - 1) & \text{if } R_i > R_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$
تابع هدف	$\sum_{t=1}^{nt} \left(\frac{(R_t - D_t)}{D_{max}} \right)^2 + \sum_{t=1}^{nt} (P1 + P2 + P3 + P4)$

نرم افزار لینگو (Lingo)

اینکه می‌توان عبارات و محدودیت‌ها را به‌طور مستقیم وارد کرد، می‌توان تمام محدودیت‌های مشابه را فقط در یک رابطه فشرده بیان کرد. این کار باعث ایجاد مدلی می‌شود که ساختارمند است و برای تعمیم‌دادن بسیار راحت‌تر است.

لینگو، ابزاری ساده برای بهره‌گیری از قدرت برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی در فرموله‌کردن مسائل خیلی بزرگ به‌صورت مختصر و تجزیه و تحلیل آنهاست. زبان مدل‌سازی لینگو به کاربر اجازه می‌دهد که مسئله را به فرمی شبیه به علایم استاندارد ریاضی بیان کند. علاوه بر

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)

گیم (۲۰۰۱)، الگوریتم جستجوی هارمونی را که از موسیقی الهام گرفته شده است، ارائه کرد. در این الگوریتم، مانند سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بهترین موقعیت بهینه سراسری به وسیله ارزیابی توابع هدف تعیین می‌شود. بهینه‌سازی جستجوی هارمونی در پنج گام خلاصه می‌شود. گام اول: معرفی مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم: ابتدا مسئله به صورت معادله (۵) مشخص می‌شود:

$$\text{Minimize } f(x) \quad x_i \in X_i, i=1,2,\dots \quad (5)$$

در مدل بهینه‌سازی، محدوده مجاز برای متغیر تصمیم به صورت $X_{i_{\min}} < X_i < X_{i_{\max}}$ که $X_{i_{\min}}$ و $X_{i_{\max}}$ به ترتیب محدوده پایین و بالای هر متغیر تصمیم است. در این گام، پارامترهای الگوریتم شامل اندازه حافظه هارمونی (HMS)، سرعت بررسی حافظه هارمونی (HMCR)، سرعت تنظیم قطعات (PAR) و ماکزیمم تعداد تکرارها (NI) وارد می‌شوند. در حافظه هارمونی بعد از به دست آوردن تابع هدف هر هارمونی، آنها مرتب می‌شوند.

گام دوم: تولید حافظه هارمونی اولیه به صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیر تصمیم (معادله (۶)):

$$HM = \begin{bmatrix} R_1^1 & R_2^1 & \dots & R_N^1 & F(R^1) \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{M} \\ R_1^{HMS-1} & R_2^{HMS-1} & \mathbf{L} & R_N^{HMS-1} & F(R^{HMS-1}) \\ R_1^{HMS} & R_2^{HMS} & \mathbf{L} & R_N^{HMS} & F(R^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که $F(R^1)$ مقدار تابع هدف به دست آمده به ازای بردار اول و HM ، ماتریس حافظه هارمونی است (معادله (۶)).

گام سوم: اصلاح هارمونی جدید: در این گام با استفاده از سه مکانیزم انتخاب تصادفی، بررسی حافظه و سرعت تنظیم قطعات، یک هارمونی جدید به صورت $R^{new} = (R_1^{new}, R_2^{new}, \dots, R_N^{new})$ تولید می‌کنند.

متغیرهای تصمیم تولید شده در این مرحله باید در محدوده مجاز باشند. $HMCR$ ، که بین مقدار صفر و یک تغییر می‌کند، سرعت انتخاب از مقادیر مرتب‌شده در حافظه هارمونی است در حالی که $1-HMCR$ سرعت انتخاب تصادفی از محدوده مجاز است.

در صورت انتخاب ارزش‌ها از داخل حافظه هارمونی، پروسه صدای مجاور اجرا می‌شود. برای هر بردار جدید به دست آمده باید امتحان شود که آیا لازم است تنظیم قطعات بر روی آن انجام شود؟ اگر جواب بله بود، با

احتمال PAR همسایه‌های بالا و پایین نقطه به دست آمده بررسی می‌شوند (معادله (۷)):

$$R_i^{new} \leftarrow R_i^{new} \pm \text{rand}() \times bw \quad (7)$$

اما اگر جواب منفی باشد، با احتمال $1-PAR$ کاری انجام نمی‌شود. bw ، فاصله اختیاری برای پهنای باند و $\text{rand}()$ ، اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند.

گام چهارم: جدیدکردن حافظه هارمونی: اگر هارمونی جدید تولید شده بهتر از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی باشد، جایگزین آن در حافظه می‌شود؛ در غیر این صورت، الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود.

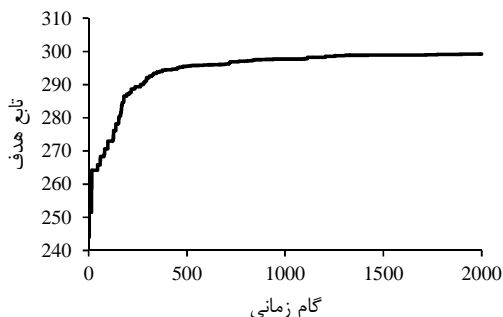
گام پنجم: بررسی معیار توقف: گام سوم و چهارم آنقدر تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی بررسی تعداد تکرار است (جنت رستمی و همکاران، ۱۳۸۹). معمولاً مقدار $HMCR$ را در محدوده $0.99-0.9$ و مقدار HMS را در محدوده $50-5$ در نظر می‌گیرند. این پارامتر به تعداد متغیرهای تصمیم وابسته است؛ هرچه اندازه حافظه هارمونی بزرگ‌تر باشد، مسئله از نظر ابعادی بزرگ می‌شود؛ بنابراین، بیشتر سعی می‌کنند این پارامتر کوچک‌تر انتخاب شود. احتمال بررسی تنظیم قطعات PAR معمولاً بین $0.99-0.3$ در نظر گرفته می‌شود؛ البته با توجه به مسئله موردنظر، ممکن است کمتر از این محدوده هم در نظر گرفته شود (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج و بحث

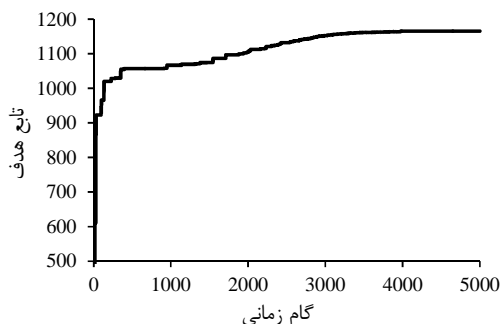
در این قسمت، مسئله چهارمخزنه و ده‌مخزنه و سپس مسئله بهره‌برداری از مخزن سد دز برای دوره میان‌مدت (۱۰ساله) با استفاده از HSA حل و نتایج آنها با نتایج بهینه مطلق حاصل از لینگو مقایسه شد.

حل مسئله چهارمخزنه و ده‌مخزنه

سیستم چهارمخزنه و ده‌مخزنه با استفاده از HSA در محیط متلب بهینه‌سازی و نتایج در جدول ۷ آورده شده است. ضرایب C_1 تا C_4 ، به ترتیب برای مسئله چهارمخزنه و ده‌مخزنه 50 و 40 در نظر گرفته شدند.



شکل ۵- نحوه همگرایی تابع هدف برای مسئله چهار مخزنه



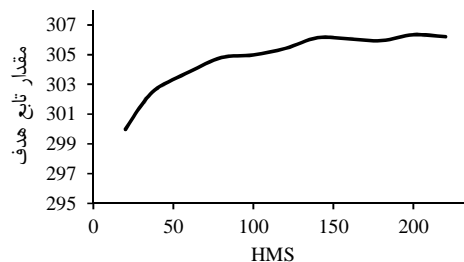
شکل ۶- نحوه همگرایی تابع هدف برای مسئله ده مخزنه

در تحقیق حاضر با استفاده از روش HSA در پایان ۱,۱۳۰,۳۶۵ تکرار به جواب $308/29$ برای مسئله چهارمخزنه رسید که فقط $0/0005$ درصد با بهینه مطلق اختلاف داشت. جدول ۱۰ نیز نتایج روش‌های مختلف را برای مسئله ده‌مخزنه نشان می‌دهد.

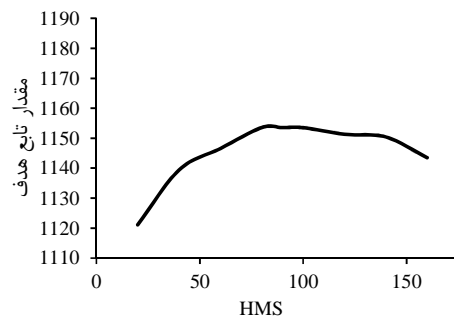
در جدول ۱۰، FCPSO^۱، مخفف روش بهینه‌سازی ذرات کاملاً مقید، PCOS01^۲ و PCOS02^۳، نیز به ترتیب مخفف اولین و دومین نسخه از روش بهینه‌سازی جزئی ازدحام ذرات مقید هستند. در تحقیق حاضر با استفاده از روش HSA در پایان ۱,۱۲۹,۹۰۱ تکرار و با HMS برابر با ۱۲۰ نتیجه $1193/1$ برای مسئله ده‌مخزنه حاصل شد که فقط $0/1$ درصد با بهینه مطلق اختلاف دارد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب رهاسازی و حجم مخزن به‌دست‌آمده از لینگو را در مقابل HSA برای مسئله چهارمخزنه و شکل‌های ۹ و ۱۰ رهاسازی و حجم مخزن به‌دست‌آمده از لینگو را در مقابل HSA برای مسئله ده‌مخزنه نشان می‌دهند. مطابق شکل‌ها، نتایج HSA با بهینه مطلق مطابقت داشت؛ فقط در برخی از دوره‌ها تفاوت جزئی مشاهده شد.

آنالیز حساسیت در روش HSA برای مسائل چهارمخزنه و ده‌مخزنه

در این مسائل، به‌منظور پیدا کردن مقدار پارامترهای بهینه از آنالیز حساسیت استفاده شده است (جدول ۸). شکل‌های ۳ و ۴، به ترتیب آنالیز حساسیت را برای یافتن تعداد HMS بهینه برای مسائل چهار و ده‌مخزنه نشان می‌دهند. پس از آنالیز حساسیت مقادیر ۳۰ و ۱۲۰ به ترتیب برای مسائل چهار و ده‌مخزنه برای HMS در نظر گرفته شد که الگوریتم در زمان کمتر و با سرعت بیشتری با اختلاف بسیار کمی به بهینه مطلق رسید. شکل ۵، نحوه همگرایی تابع هدف را برای مسئله چهارمخزنه تا ۲۰۰۰ گام اول نشان می‌دهد. تا ۵۰۰ تکرار اول، تابع تغییرات زیادی دارد و بعد از آن تا تکرار ۱۵۰۰ از میزان تغییرات کاسته می‌شود و سپس، تغییرات بسیار جزئی است. شکل ۶، نیز نحوه همگرایی تابع هدف را برای مسئله ده‌مخزنه تا ۵۰۰۰ گام اول نشان می‌دهد. مطابق شکل تا ۲۰۰۰ تکرار اول تابع تغییرات زیادی دارد و بعد از آن تا تکرار ۳۰۰۰ از میزان تغییرات کاسته می‌شود و سپس، تغییرات بسیار جزئی است. جدول ۹ نیز نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف را برای مسئله چهارمخزنه نشان می‌دهد.



شکل ۳- آنالیز حساسیت مقدار HMS مسئله چهارمخزنه



شکل ۴- آنالیز حساسیت مقدار HMS مسئله ده مخزنه

1- Fully Constrained Particle Swarm Optimization
2- Partially Constrained Particle Swarm Optimization 1
3- Partially Constrained Particle Swarm Optimization 2

جدول ۷- نتایج حل سیستم چهار مخزنه و ده مخزنه با استفاده از نرم‌افزار لینگو و HSA و درصد اختلاف آنها

مسئله	جواب نرم‌افزار لینگو	جواب الگوریتم HS	درصد اختلاف جواب لینگو و HS
سیستم چهار مخزنه	۳۰۸/۲۹۱۵	۳۰۸/۲۹۰۰	۰/۰۰۰۵
سیستم ده مخزنه	۱۱۹۴/۴	۱۱۹۳/۱	۰/۱

جدول ۸- مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم HS

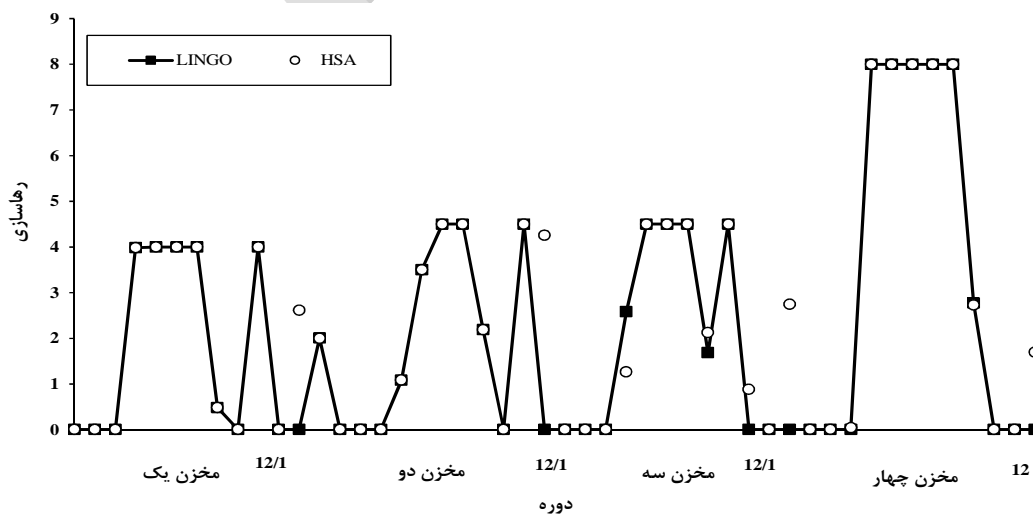
مسئله	HMCR	PAR	HMS
سیستم چهار مخزنه	۰/۹۸	۰/۰۳	۳۰
سیستم ده مخزنه	۰/۹۸	۰/۹۸	۱۲۰

جدول ۹- نتایج روش‌های مختلف برای مسئله چهار مخزنه

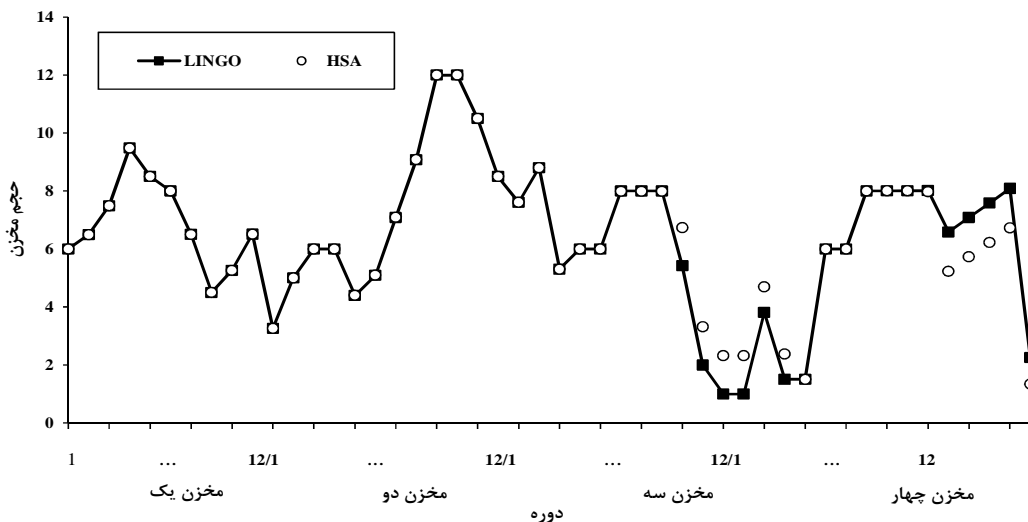
محقق	سال	نام روش	تعداد تکرار	جواب
چو و کورتس ریورا	۱۹۷۴	DDDP	-	۳۰۸/۲۶۶۵
موری و یاکوویز	۱۹۷۹	DDP	۸	۳۰۸/۲۳۴
جلالی	۲۰۰۵	ACO	۳۰۰۰	۳۰۷/۷۲۴
بزرگ حداد و افشار	۲۰۱۱	HBMO	۶۵۰۰۰	۳۰۸/۲۴۲
کوبیاز و تئودوزیو	۲۰۱۱	HSA	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰۷/۲۱۸

جدول ۱۰- نتایج روش‌های مختلف برای مسئله ده مخزنه

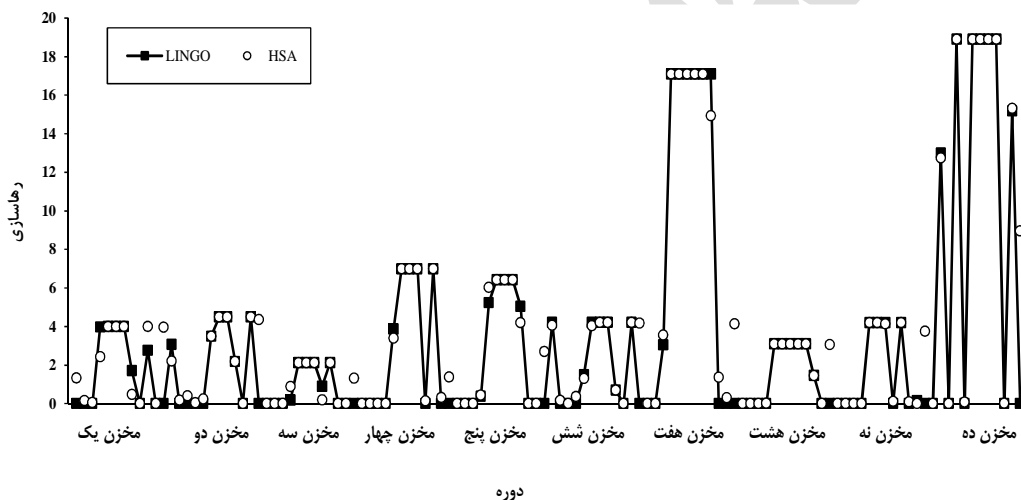
محقق	سال	نام روش	تعداد تکرار	جواب
واردلاو و شریف	۱۹۹۹	HBMO	۱،۲۵۰،۰۰۰	۱۱۹۰/۲۵
واردلاو و شریف	۱۹۹۹	DDP	-	۱۱۹۰/۶۵
جلالی و همکاران	۲۰۰۵	ACO	۳۰۰۰	۱۱۹۲/۳۹
بزرگ حداد و همکاران	۲۰۱۱	HBMO	۶۵۰۰۰	۱۱۹۲/۵۶
افشار	۲۰۱۳	FCPSO	-	۱۱۹۴/۰۵
افشار	۲۰۱۳	PCOSO1	-	۱۱۷۸/۵۵
افشار	۲۰۱۳	PCPSO2	-	۱۱۹۱/۷۵



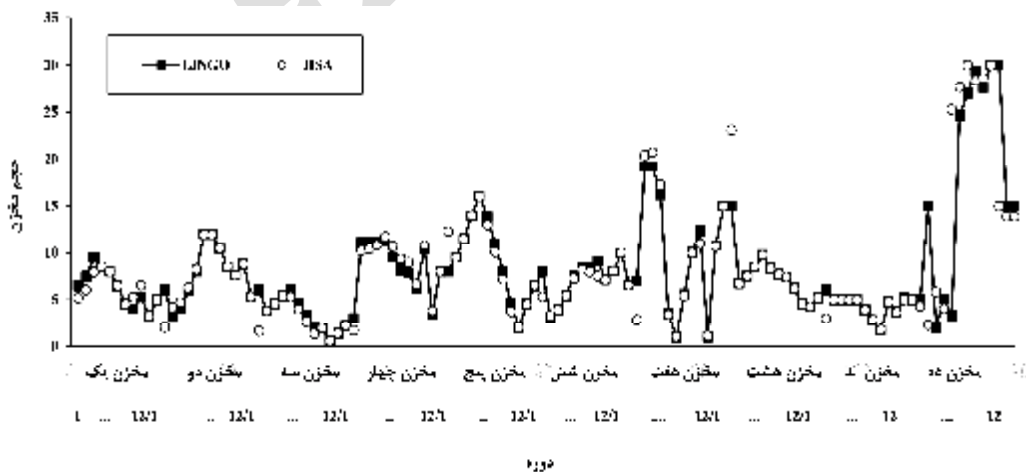
شکل ۷- مقایسه رهاسازی به دست آمده از لینگو و HSA (سیستم چهارمخزنه)



شکل ۸- مقایسه حجم مخزن به دست آمده از لینگو و HSA (سیستم چهارمخزنه)



شکل ۹- مقایسه رهاسازی به دست آمده از لینگو و HSA (سیستم ده مخزنه)



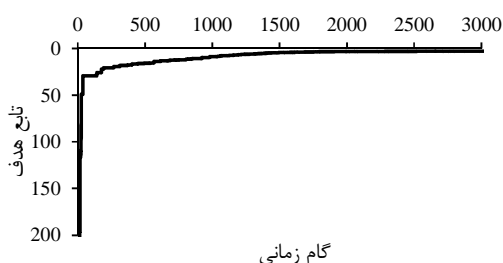
شکل ۱۰- مقایسه حجم مخزن به دست آمده از لینگو و HSA (سیستم ده مخزنه)

حل مسئله تک‌مخزنه سد دز

برای بهره‌برداری بهینه مخزن برای دوره میان‌مدت از بین ۴۰ سال آمار از آمار ۱۰ سال ابتدایی (۱۲۰ دوره ماهیانه) سد مخزنی دز برای مدل‌سازی HS استفاده شد. مقدار تابع هدف با استفاده از نرم‌افزار لینگو برابر با $1/9188$ و با استفاده از HS برابر با $1/944$ محاسبه شد که $1/31\%$ با بهینه مطلق اختلاف داشت.

آنالیز حساسیت در روش HSA برای مسئله تک‌مخزنه سد دز

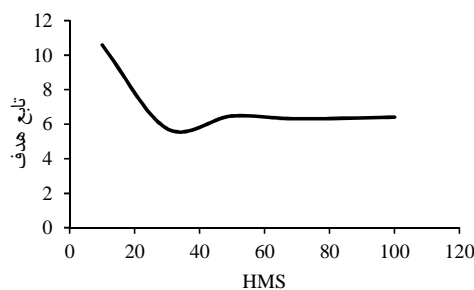
با انجام آنالیز حساسیت مقدار بهینه پارامترهای $0/98 = HMCR$ و $0/01 = PAR$ و $30 = HMS$ به دست آمد. شکل ۱۱، آنالیز حساسیت را برای یافتن HMS بهینه نشان می‌دهد. بعد از اجرای برنامه، حتی در تکرارهای بالا جریمه صفر نمی‌شد که به دلیل قرارگرفتن بخشی از جواب‌های به دست آمده در محدوده جواب‌های نشدنی است. از میان قیود تعریف شده، بیشترین تخطی مربوط به حجم ماکزیمم مخزن (P_2) بود و در بعضی از ماه‌ها حجم ماکزیمم مخزن از 3340 بیشتر می‌شد؛ در نتیجه، $10 = C_2 = C_1 = C_3 = C_4$ انتخاب شد.



شکل ۱۲- نحوه همگرایی تابع هدف برای ۱۲۰ ماه

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، الگوریتم بهینه‌یابی جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی سیستم‌های چند مخزنه و سپس سیستم تک‌مخزنه سد دز برای دوره ۱۰ ساله مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این الگوریتم با موفقیت مسائل پیچیده چهار و ده مخزنه را بهینه‌سازی کرد و نتایج بسیار خوبی ارائه داد که به ترتیب $0/0005$ و $0/1$ درصد با بهینه مطلق اختلاف داشت و نشان داد که الگوریتم هارمونی، یک ابزار قدرتمند بوده که نه تنها می‌تواند مسائل بهینه‌سازی معمول را با موفقیت بهینه‌سازی کند؛ بلکه توانایی حل مسائلی را نیز دارد که شامل متغیرهای پیوسته و فضای جستجوی گسترده است. بنابراین، برای سنجش توانایی الگوریتم بهینه‌سازی مسئله واقعی سد دز برای دوره میان‌مدت (۱۰ ساله) در نظر گرفته شد. در مطالعه موردی سد دز هدف مینیمم‌سازی کمبود آب در بخش کشاورزی در اراضی پایین دست سد است. در این مورد نیز الگوریتم با موفقیت مسئله پیچیده ۱۲۰ بعدی را بهینه‌سازی کرد و جواب به دست آمده $1/31\%$ با جواب بهینه مطلق حاصل از نرم‌افزار لینگو اختلاف داشت. بنابراین، می‌توان نتیجه

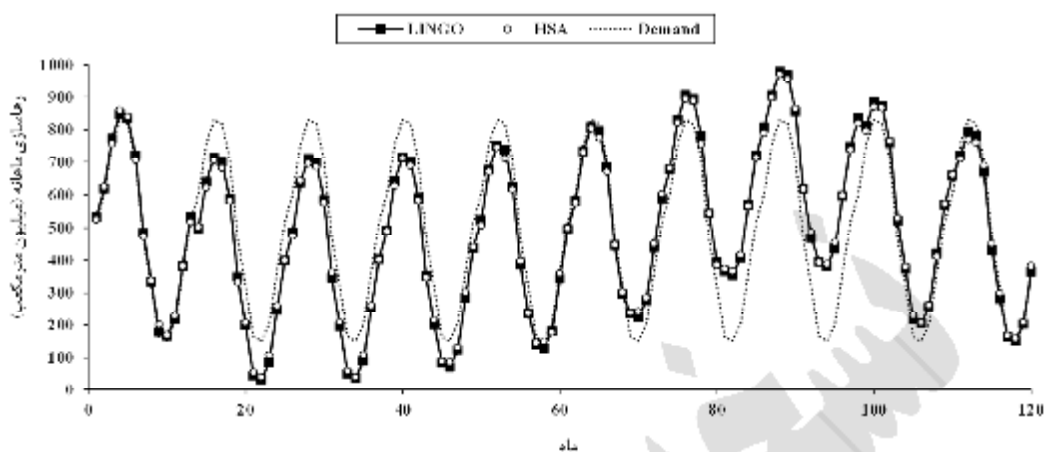


شکل ۱۱- آنالیز حساسیت مقدار HMS برای ۱۲۰ ماه

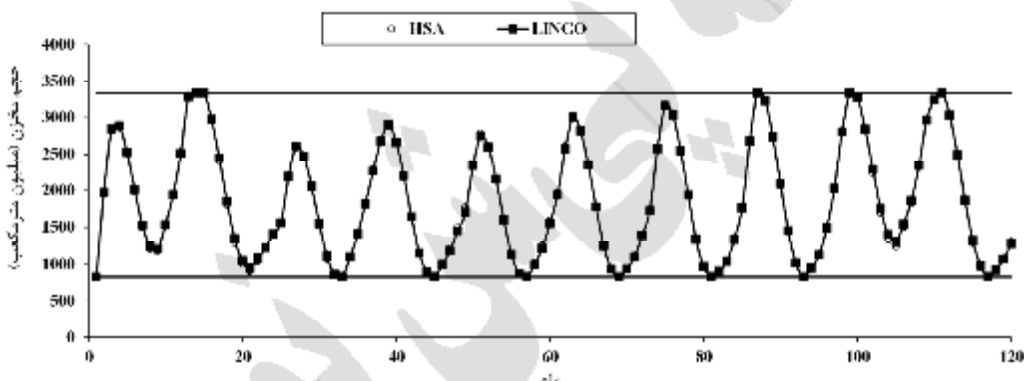
در شکل ۱۲، نیز نحوه همگرایی الگوریتم در دوره میان‌مدت (۱۲۰ ماه) برای رسیدن به جواب نشان داده شده است. تا تکرار ۵۰۰ تغییرات الگوریتم بسیار شدید است و پس از آن از تکرار ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ از میزان تغییرات کاسته شده و از تکرار ۱۵۰۰ به بعد تغییرات بسیار جزئی می‌شود. شکل ۱۳، حجم رهاسازی به دست آمده از روش HS و لینگو به همراه نیاز ماهانه را نشان می‌دهد. در ۱۳ ماه اول، رهاسازی بیشتر از نیاز است و این به دلیل بالا بودن جریان ورودی به مخزن است. در برخی از ماه‌ها

تعداد زیاد متغیرهای تصمیم برخوردار است.

گرفت که HSA از توانایی بالایی برای حل مسائل پیچیده بهره‌برداری سیستم‌های چند مخزنه و تک‌مخزنه واقعی با



شکل ۱۳- رهاسازی به‌دست‌آمده از الگوریتم HS و نرم‌افزار لینگو برای ۱۲۰ ماه



شکل ۱۴- حجم مخزن به‌دست‌آمده از الگوریتم HS و نرم‌افزار لینگو برای ۱۲۰ ماه

algorithm to optimal operation of multi-reservoirs system. Electrical Power and Energy Systems. 51: 71-81.

5. Chow V. T. and Cortes R. 1974. Applications of DDDP in water resources planning. Research Report 78. University of Illinois. Water Resources Center. Urbana.
6. Geem Z. W. Kim J. H. and Loganathan G. 2001. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. Simulation. 76(2): 60-68.
7. Heidari M. chow V. T. Kokotovic P. V. and Meredith D. D. 1971. Discrete different a dynamic programing approach to water resources systems optimization. Water Resources Research. 7(2): 273-282.
8. Jalali M. R. Afshar A. and Marino M. 2007. Multi-colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problem. Water Resources Management. 21: 1429-1447.

منابع

۱. برهانی داریان ع و مرتضوی نائینی م. ۱۳۸۷. مقایسه کاربرد روش‌های کاوشی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب. مجله آب و فاضلاب. ۴۸(۴): ۵۷-۶۶.
۲. بزرگ حداد آ. ۱۳۸۴. بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO). رساله دکترا. دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۶۳ ص.
۳. جنت رستمی س. خلقی م. و بزرگ حداد آ. ۱۳۸۹. مدیریت بهره‌برداری از سدهای مخزنی با استفاده از الگوریتم اصلاح شده جستجوی هارمونی. مجله دانش آب و خاک. ۱/۲۰(۳): ۶۱-۷۱.
4. Afshar M. H. 2013. Extension of the constrained particle swarm optimization

9. Lee K. S. and Geem Z. W. 2005. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 194: 902-3933.
10. Lin Ch. Ch. Deng D. J and Wang Sh. B. 2016. Extending the Lifetime of Dynamic Underwater Acoustic Sensor Networks Using Multi-Population Harmony Search Algorithm. *IEEE Sensors Journal*. 16: 4034-4042.
11. Mahdavi M. Fesanghary M. and Damangir E. 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*. 188: 1567-1579.
12. Michalewicz Z. and Schoenauery M. 1996. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary Computation* 4(1): 1-32
13. Mousavi S. J. Nakhaei P. Sadollah A. and Kim J. H. 2017. Optimization of Hydropower Storage Projects Using Harmony Search Algorithm. *International Conference on Harmony Search Algorithm*. 514: 261-270.
14. Murray D. M. and Yakowitz S. J. 1979. Constrained differential dynamic programming and its application to multi-reservoir control. *Water Resources Research*. 15(5): 1017-1027.
15. Wardlaw R. and Sharif M. 1999. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation. *Water Resources Planning Management*: pp. 25-33.