

کاربرد الگوریتم جستجوی هارمونی در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد دز برای دوره بلندمدت

مریم میربیک سبزواری^۱، حسن ترابی پوده^{۲*}، حجت الله یونسی^۳

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: torabi.ha@ut.ac.ir

چکیده

بهره‌برداری از مخازن تحت تأثیر اهداف فراوانی است و عموماً بسیاری از این اهداف با یکدیگر در تناقض هستند. از طرفی جریان‌های ورودی به مخزن و حجم‌های ذخیره دارای عدم قطعیت هستند که باعث افزایش پیچیدگی‌های بهره‌برداری از مخازن شده است. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای تعیین سیاست بهره‌برداری از مخازن، مسئله‌ای مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. روش‌های فراکاوشی به‌عنوان یک ابزار سودمند در بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده توسعه داده شده‌اند. در تحقیق حاضر، به‌منظور ارزیابی توانایی الگوریتم HS در حل مسئله بهره‌برداری مخزن و همچنین به‌منظور نشان دادن کارایی الگوریتم در حل مسائل با تعداد زیاد متغیرهای تصمیم، بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد دز برای یک دوره آماری بلند مدت (۴۰ سال) در نظر گرفته شده است. هدف تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست می‌باشد. مقدار بهینه مطلق تابع هدف با نرم‌افزار لینگو برابر ۱۰/۵۵ و با استفاده از الگوریتم HSA برابر ۱۹/۷۸ محاسبه گردید. نتیجه حاصل از الگوریتم HSA با الگوریتم‌های HBMO و ACO مقایسه و معلوم شد که الگوریتم HSA جواب بهتری نسبت به الگوریتم‌های HBMO و ACO ارائه داده است. بنابراین، می‌توان استفاده از این الگوریتم را در بهره‌برداری بهینه از مخازن با توابع هدف پیچیده‌تر و تعداد مخازن بیشتر توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی، سد دز، فراکاوشی، لینگو

Application of Harmony Search Algorithm in Optimization of the Dez Dam Reservoir Operation for Long Period

M Mirbeyk Sabzevari¹, H Torabi Podeh^{2*}, H Younesi³

Received: Accepted:

¹ M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

² Assoc. Prof., Department of Water Engineering, College of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

³ Assis. Prof., Department of Water Engineering, College of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

*Corresponding author, E-mail: torabi.ha@lu.ac.ir

Abstract

Operation of reservoirs is influenced by lots of goals and generally many of these objectives are inconsistent with each other. The inflows of reservoir and storage volumes are uncertain, which lead to increase the complexity of the operation of the reservoirs. Utilization of optimization methods to determine the operational policy of the reservoirs is an important issue in the planning and management of water resources. Heuristic techniques have been developed as a tool in the optimization of complex systems. In this study, in order to evaluate the ability of the HSA in solving the problem of reservoir operation, and also to present the algorithm's efficiency in solving the problems with a large number of decision variables, optimization of the Dez dam reservoir operation is considered for a long time period (40 years). The goal is supplying the agricultural water demand of downstream. The global optimum value of the objective function was calculated 10.55 by application of the Lingo software and 19.78 by use of the HAS algorithm. The results of HSA were compared with HBMO and ACO algorithms and it was revealed that the HSA could present a better solution than HBMO and ACO algorithms. So, the use of this algorithm for optimal operation of reservoirs with more complex objective function and a greater number of reservoirs, could be recommended.

Keywords: Dez Dam, Harmony Search Algorithm, Lingo, Meta- heuristic, Optimization

مقدمه

شده است. چالش اصلی تعیین بهترین رهاسازی مخزن و بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها است. روش‌های بهینه‌سازی مختلفی برای بهره‌برداری از مخازن معرفی شده است که می‌توان آنها را به صورت زیر دسته‌بندی نمود (رانی و موریرا ۲۰۱۰):

۱- روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی (LP) ۲- برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) ۳- روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا (DP) و ۴- الگوریتم‌های فراکاوشی. استفاده از LP تنها برای مسائلی که تابع هدف و قیود خطی باشند کاربرد دارد. از مدل NLP هم زمانی استفاده می‌شود که تابع هدف و قیود غیر خطی باشند (بازارا و همکاران ۲۰۰۶). در روش DP مسئله

وجود دوره‌های خشکسالی در دهه‌های گذشته، افزایش روزافزون جمعیت، کاهش منابع آب سطحی موجود در سیستم مخازن سدها، باعث گردیده است که در اعمال برنامه مدیریتی بهره‌برداری از مخازن سدها دقت بیشتری شود تا آب ذخیره شده در سدها بتوانند در مواقع بحرانی پاسخگوی نیازها باشند. فرآیند تصمیم‌گیری در بهره‌برداری از مخازن تحت تأثیر اهداف فراوانی است و عموماً بسیاری از این اهداف با یکدیگر نامتناسب هستند. از طرفی جریان‌های ورودی به مخزن و حجم‌های ذخیره دارای عدم قطعیت هستند که باعث افزایش پیچیدگی‌های بهره‌برداری از مخازن

منحنی فرمان بهره‌برداری را مطالعه کردند. اولیویرا و لاکس (۱۹۹۷) از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی‌های فرمان سیستم چند مخزنی استفاده و آن را به عنوان راهکاری جهت سیاست بهره‌برداری بهینه سیستم مخازن پیشنهاد کردند. الگوریتم HS در مسائل بهینه‌سازی عملی نظیر بهینه‌سازی ساختاری، تخمین پارامترهای مدل غیر خطی ماسکینگام^۶، طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب، مسیریابی، طراحی اسکلت‌های فلزی، مدل‌های انتقال انرژی و... به کار رفته است (مهدوی و همکاران ۲۰۰۷، لی و گیم ۲۰۰۵). کای و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از GA به حل مسائل غیر خطی در منابع آب پرداختند. چن (۲۰۰۳) با استفاده از الگوریتم ژنتیک منحنی‌های فرمان بهره‌برداری مخزن را استخراج نموده است. لی و گیم (۲۰۰۵) HSA را برای بهینه‌سازی سه مسئله مهندسی شامل مسائل کمینه سازی شش تابع مقید و نامقید و مسائل بهینه‌سازی پنج ساختاری با متغیرهای طراحی پیوسته به کار بردند که موثر و قدرتمند بودن HSA را در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی نشان داد. گیم (۲۰۰۹) HSA را برای بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار بردند که نتایج بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های محاسباتی در هزینه طراحی متوسط به دست آمد. فتانت و شفیع‌پور (۲۰۱۱) HSA را برای هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهت‌دار در سیستم قدرت به کار بردند که نتایج بسیار رضایت‌بخش بود و ثابت می‌کرد که روش HSA در رسیدن به یک راه حل بهینه، سریع عمل می‌کند.

لایب (۲۰۱۳) الگوریتم جستجوی هارمونی الهام گرفته از کوانتومی را برای مسائل بهینه سازی به کار برد. نتایج، اثر بخشی الگوریتم مبتنی بر جستجوی هارمونی و توانایی آن را در دستیابی به راه حل‌های با کیفیت خوب نشان داد. بشیری و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد HSA را در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن با هدف کنترل سیلاب بررسی کردند. الگوریتم HSA نتایج رضایت‌بخشی در سرعت همگرایی به یک مقدار تابع

بهینه‌سازی و متغیرهای آن به چند مسئله بهینه‌سازی کوچکتر تقسیم می‌شود که حل مرحله‌به‌مرحله‌ای آن منجر به حل مسئله اصلی خواهد شد. الگوریتم‌های فراکوشی نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه، می‌توان به الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) (هولند ۱۹۷۵)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ (PSO) (کندی و ابرهات ۱۹۹۵)، الگوریتم مورچگان^۳ (ACO) (دوریگو ۱۹۹۶) و بهینه‌یابی جفت-گیری زنبور عسل^۴ (HBMO) (عباس ۲۰۰۱) اشاره نمود. الگوریتم جستجوی هارمونی^۵ (HAS) نیز توسط گیم (۲۰۰۰) ارائه شد.

جلالی (۲۰۰۵) الگوریتم جامعه مورچه‌ها را برای حل مسائل طراحی و بهره‌برداری بهینه هیدروسیستم‌ها به کار گرفت. بزرگ حداد (۲۰۰۵) از الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل در بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها از جمله بهره‌برداری سیستم تک مخزنه استفاده نمود. داریان و مرتضوی (۲۰۰۸) بهره‌برداری مخزن سد دز را با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچه برای یک دوره کوتاه مدت (یک‌ساله) و بلند مدت مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری نسبت به الگوریتم مورچه و برنامه‌ریزی پویا در مسائل بهینه‌سازی دارد. جنت‌رستمی و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتم جستجوی هارمونی را در بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن به کار گرفتند. نتایج مقایسه این الگوریتم با روش‌های الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی پویا و برنامه‌ریزی غیرخطی نشان داد که این الگوریتم در مواقعی که استفاده از روش‌های ریاضی متداول مقدور نیست، روش مناسبی می‌باشد و نسبت به الگوریتم ژنتیک دقیقتر و سریعتر عمل می‌کند. در حوضه صوفی چای، دین‌پژوه و همکاران (۲۰۱۶) با الگوریتم PSO منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن را بهینه کردند. در حوضه‌های صوفی چای و سد دز، اکبری آلاشتی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم Poly-Hydro

^۱ Genetic Algorithm

^۲ Particle Swarm Optimization

^۳ Ant Colony Optimization

^۴ HBMO

^۵ Harmony Search Algorithm (HSA)

^۶ Muskingum

سد دز، بلندترین سد دو قوسی ایران است که در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر دزفول بر روی شاخه اصلی رودخانه دز و در ۱۰۰ کیلومتری بالادست محل اتصال دو رودخانه دز و کارون احداث شده است (داریان و مرتضوی ۲۰۰۸). یکی از مصرف‌کنندگان عمده پایین‌دست سد دز شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری می‌باشد (جنت‌رستمی و همکاران ۲۰۱۰). متوسط جریان سالانه به مخزن برابر ۵۹۰۰ (MCM)، حجم مفید مخزن معادل ۲۵۱۰ (MCM)، متوسط نیاز سالانه پایین‌دست برابر ۵۳۰۳ (MCM)، حجم حداقل (مرده) مخزن برابر ۸۳۰ (MCM) و حجم حداکثر مخزن نیز برابر ۳۳۴۰ (MCM) در نظر گرفته شده است. طول تاج سرریز ۲۱۲ متر، ارتفاع از پی ۲۰۳ متر، عرض تاج ۴/۵ متر، وسعت مخزن در رقوم حداکثر ۶۵ (km²)، طول مخزن در رقوم حداکثر ۶۴/۹ (km)، متوسط نیاز کشاورزی ماهانه پایین‌دست (تقاضا بر حسب MCM) برای یک سال دوره آماری در جدول ۱ ارائه شده است و چون مقدار نیاز کشاورزی در هر سال ثابت است برای هر سال این مقدار تکرار می‌شود. میزان متوسط افت خالص ماهانه (تبخیر منهای بارش) در جدول ۲ ارائه شده است (بزرگ حداد ۲۰۰۵).

هدف در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند HBMO و یک روش غیرخطی نشان داد. لین و همکاران (۲۰۱۶) HSA چند جمعیتی را برای گسترش طول عمر شبکه‌های سنسور صوتی آب زیرزمینی به‌کار 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 هدف ارزیابی توانایی الگوریتم HSA در حل مسئله بهره‌برداری مخزن و همچنین ارائه کارایی الگوریتم در حل مسائل با تعداد زیاد متغیرهای تصمیم می‌باشد، به‌همین منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز واقع در استان خوزستان برای دوره آماری (۲۰۳۰-۱۹۹۰) با ۴۸۰ ماه در نظر گرفته شده است. در مسئله سد دز، هدف تأمین نیاز کشاورزی پایین دست و یا به‌عبارتی، تعیین بهینه‌ترین رهاسازی ماهانه برای ۴۰ سال بهره‌برداری است. نتایج بهینه مطلق بهره‌برداری توسط نرم‌افزار لینگو محاسبه شده و نتایج الگوریتم HSA با لینگو و نتایج الگوریتم‌های HBMO و ACO مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

جدول ۱- نیاز متوسط ماهانه در پایین‌دست (MCM) (بزرگ حداد ۲۰۰۵).

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 ۲- میزان متوسط افت خالص ماهانه (mm) (بزرگ حداد ۲۰۰۵).

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
افت	۸۲/۴	۱۸۸/۵	۲۷۱/۹	۲۸۸/۷	۲۸۰	۲۷۴/۹	۱۱۵/۵	۹۳/۶	-۲/۹	-۴۶/۷	-۱۸/۸	۰/۹

به‌صورت حداقل کردن مجموع مجذور نسبت تفاضل مقدار رهاسازی از مقدار نیاز مخزن به بیشینه نیاز در

مدل بهره‌برداری از مخزن

به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی ابتدا باید مدل بهره‌برداری از مخزن مشخص شود. تابع هدف

مخزن کمتر یا از حجم حداکثر آن بیشتر شود. در خصوص اعمال قیود مسئله مطالعات زیادی صورت گرفته است (السن ۱۹۹۴). گلوور و گرینبرگ (۱۹۸۹) پیشنهاد کردند که برای بهینه‌سازی سریع و رسیدن به جواب نهایی بهتر، امکان عبور از محدوده‌های غیر ممکن به الگوریتم داده شود. یکی از این راهکارها حذف قید و اعمال جریمه به تخطی از قیود و وارد نمودن آن به تابع هدف است. میزان تابع جریمه به صورت رابطه زیر به تابع هدف افزوده می‌شود:

$$P=C.\Delta^n \quad [۷]$$

که در آن P میزان جریمه، Δ میزان تخطی از قید، C و n پارامترهای تابع جریمه می‌باشند که توسط کاربر و با توجه به مسئله انتخاب می‌شدند. در مقاله حاضر، توابع جریمه به صورت زیر تعریف شده اند:

$$P1=\begin{cases} C_1.(1-S_i/S_{min}) & \text{if } S_i < S_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad [۸]$$

$$P2=\begin{cases} C2.(S_i/S_{max}-1) & \text{if } S_i > S_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad [۹]$$

توابع جریمه مربوط به رهاسازی:

$$P3=\begin{cases} C3.(1-R_i/R_{min}) & \text{if } R_i < R_{min} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad [۱۰]$$

$$P4=\begin{cases} C2.(R_i/R_{max}-1) & \text{if } R_i > R_{max} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad [۱۱]$$

در نهایت، تابع هدف (F) به صورت رابطه زیر نوشته می‌شد:

$$F=\sum_{t=1}^{nt}\left(\frac{(R_t-D_t)}{D_{max}}\right)^2+\sum_{t=1}^{nt}(P1+P2+P3+P4) \quad [۱۲]$$

ضرایب C_1 تا C_4 مربوط به تابع جریمه می‌باشند که با توجه به مسئله انتخاب خواهند شد. در بخش نتایج و بحث به مقادیر انتخاب شده برای آنها اشاره شده است.

الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)

گیم (۲۰۰۰) الگوریتم جستجوی هارمونی را ارائه نمود که از پدیده موسیقی الهام گرفته شده است. این الگوریتم به وسیله تخمین زیبایی‌شناسی در جستجوی یک موقعیت خارق‌العاده از هارمونی است و مانند سایر

طول دوره بهره‌برداری است که می‌تواند به صورت رابطه ۱ بیان شود (بزرگ حداد ۲۰۰۵):

$$\text{Min TSD} = \sum_{t=1}^{nt} \left(\frac{(R_t - D_t)}{D_{max}} \right)^2 \quad [۱]$$

رابطه پیوستگی در مخزن به صورت رابطه ۲ بیان شده است:

$$S(t)=S(t+1)-Q(t)+R(t)+L(t) \quad [۲]$$

$$R_{min}(t) \leq R(t) \leq R_{max}(t) \quad [۳]$$

$$S_{min}(t) \leq S(t) \leq S_{max}(t) \quad [۴]$$

$$S_1 = 830 \quad [۵]$$

در روابط بالا TSD تابع هدف (مجموع مجذور تفاضل رهاسازی ماهانه از تقاضا)، D_i مقدار نیاز در ماه t ام (MCM)، $R(t)$ رهاسازی مخزن در ماه t ام (MCM)، D_{max} بیشترین نیاز ماهانه در طول دوره بهره‌برداری بوده که برابر با $831/8$ (MCM) می‌باشد. $S(t), S(t+1)$ به ترتیب حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره (MCM)، Q جریان ورودی به مخزن در طول دوره (MCM) می‌باشد. L نمایانگر سرریز، تبخیر و دیگر افت‌های موجود بوده که از حاصلضرب سطح مخزن در ارتفاع افت ماهانه به دست می‌آید. با استفاده از رابطه زیر می‌توان حجم مخزن را به سطح مخزن متناظر با آن در محدوده بین سطوح و احجام حداقل تا حداکثر مخزن تبدیل نمود (بزرگ حداد ۲۰۰۵).

$$A(t)=11.291+0.0157 \times S(t) \quad [۶]$$

R_{min} و R_{max} به ترتیب رهاسازی حداقل و حداکثر که به ترتیب برابر ۰ و ۱۰۰۰ (MCM)، S_{min} و S_{max} به ترتیب حجم حداقل مخزن برابر ۸۳۰ (MCM) و حجم حداکثر مخزن یعنی ۳۳۴۰ (MCM)، S_1 حجم اولیه مخزن برابر با ۸۳۰ MCM در نظر گرفته شده‌اند. رهاسازی حداقل و حداکثر نیز به ترتیب، برابر ۰ و ۱۰۰۰ (MCM) می‌باشد. علاوه بر روابط بالا، بایستی برای مدل بهره‌برداری قیودی در نظر گرفته شود. در مسائل بهینه سازی، قیود یکی از ارکان اصلی هستند. قیود در مسائل، محدوده جواب ممکن را تعریف می‌نمایند. مثلاً حجم آب مخزن نمی‌تواند از حجم حداقل

ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت رابطه ۱۳ مشخص می‌گردد:

$$\text{Minimize } f(x) \quad x_i \in X_i, i=1,2,\dots,N \quad [13]$$

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 می‌باشد. در این گام، یک سری پارامترهایی مخصوص الگوریتم جستجوی هارمونی از جمله: اندازه حافظه هارمونی (HMS) که تعداد بردارهای جواب را در حافظه هارمونی نشان می‌دهد، سرعت بررسی حافظه هارمونی (HMCR)، سرعت تنظیم قطعات (PAR) و حداکثر تعداد تکرارها NI یا شرط توقف وارد می‌شود. در حافظه هارمونی بعد از به دست آوردن تابع هدف هر یک از هارمونی‌ها، آنها مرتب می‌شوند.

گام دوم: تولید حافظه هارمونی اولیه به صورت تصادفی از محدوده مقادیر ممکن متغیر تصمیم (جنت‌رستی و همکاران ۲۰۱۰)

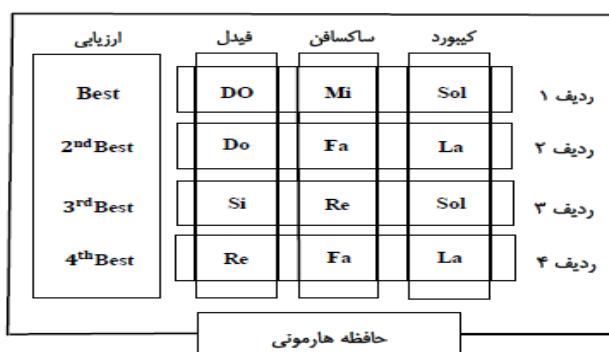
$$HM = \begin{bmatrix} R_1^1 & R_2^1 & \dots & R_N^1 & F(R^1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ R_1^{HMS-1} & R_2^{HMS-1} & \dots & R_N^{HMS-1} & F(R^{HMS-1}) \\ R_1^{HMS} & R_2^{HMS} & \dots & R_N^{HMS} & F(R^{HMS}) \end{bmatrix} \quad [14]$$

که $F(R^1)$ مقدار تابع هدف به دست آمده به ازای بردار اول و HM ماتریس حافظه هارمونی است (جنت رستی و همکاران ۲۰۱۰).

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 تصمیمی که در این مرحله تولید می‌شوند باید در محدوده مجاز باشند. HMCR سرعت انتخاب از مقادیر مرتب شده در حافظه هارمونی بوده و مقدار آن بین ۰ و ۱ می‌باشد در حالی که 1-HMCR سرعت انتخاب تصادفی از محدوده مجاز می‌باشد.

$$R_i^{new} \begin{cases} R_i^{new} \in \{R_1^1, R_2^1, \dots, R_1^{new}\} & \text{with probability HMCR} \\ R_i^{new} \in R(t) & \text{with probability (1-HMCR)} \end{cases} \quad [15]$$

الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهترین موقعیت بهینه سراسری به وسیله ارزیابی توابع هدف تعیین می‌شود. در شکل ۱ ساختار حافظه هارمونی با ترکیبی از سه ساز در یک ارکستر سه نفره متشکل از فیدل، ساکسافن^۱ و کیبورد^۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا حافظه توسط هارمونی‌های تصادفی (Do, Mi, Sol)، (Do, Fa, La)، (Si, Re, Sol) و (Re, Fa, La) پر شده و سپس به وسیله تخمین زیباشناسی هارمونی‌ها مرتب شده‌اند. در این فرآیند در هارمونی جدید، از سه ابزار موسیقی استفاده می‌شود، برای مثال، هارمونی (Do, Fa, La) تشکیل شده است از: صدای {Do} از بین صداهای فیدل {Do, Do, Si, Re}، و به همین ترتیب. هر نقطه در حافظه هارمونی با احتمال مشابه انتخاب می‌شود، برای مثال، هر یک از نقاط Fa و Mi و Fa و Re یا Fa از صداهای ساکسافن در حافظه با احتمال ۲۵ درصد انتخاب می‌شوند. بعد از ساخت بردار جدید، اگر بردار جدید ساخته شده (Do, Fa, La) بهتر از هر یک از بردارهای موجود در حافظه هارمونی باشد در این صورت هارمونی جدید به جای بدترین هارمونی موجود (در این مثال هارمونی (Re, Fa, La)) وارد حافظه هارمونی می‌شود. این فرآیند تا زمانی که جواب نزدیک به بهینه به دست آید، تکرار گردید.



شکل ۱- ساختار حافظه هارمونی (HM) (گیم ۲۰۰۰).

به طور کلی، فرآیند بهینه‌سازی در روش جستجوی هارمونی در پنج گام خلاصه می‌شود:

گام اول: معرفی مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای الگوریتم

¹ Saxophone

² Keyboard

۲۰۱۰). معمولاً مقدار HMCR را در محدوده ۰/۹۹-۰/۹۰ در نظر می‌گیرند. اندازه حافظه هارمونی HMS را در محدوده ۵-۵۰ 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 را معمولاً بین ۰/۳-۰/۹۹ در نظر می‌گیرند، البته باتوجه به مسئله مورد نظر ممکن است کمتر از این محدوده را هم در نظر بگیرند (مهدوی و همکاران ۲۰۰۷). شکل ۲ فلوجارت الگوریتم HS را نشان می‌دهد. کدنویسی الگوریتم جستجوی هارمونی نیز در محیط برنامه‌نویسی متلب صورت گرفت.

مدل برنامه‌ریزی غیرخطی

با توجه به اینکه مسئله مورد نظر یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی بوده، این مسئله را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل نمود. مدل لینگو یک مدل برنامه‌ریزی خطی بوده که توانایی حل مدل‌های غیرخطی را نیز دارا می‌باشد و در مواردی مانند مسئله مورد نظر که تابع هدف محدب می‌باشد، جواب بهینه مطلق را ارائه می‌دهد.

نتایج و بحث

در این قسمت مسئله بهره‌برداری از مخزن برای دوره بلندمدت حل شده و سپس با انجام تحلیل حساسیت مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم به دست می‌آید. در ادامه، نتایج با جواب بهینه مطلق حاصل از نرم‌افزار لینگو و جواب حاصل از الگوریتم‌های HBMO و ACO مقایسه خواهد شد.

به‌عنوان مثال، اگر HMCR برابر ۰/۸۵ باشد، الگوریتم با احتمال ۸۵ درصد بردار جدید را از بین بردارهای مرتب شده در حافظه هارمونی و با احتمال ۱۵ درصد بردار جدید به‌صورت تصادفی در محدوده مجاز انتخاب می‌کند. این مسئله شبیه الگوریتم ژنتیک است که سرعت جهش در پروسه انتخاب استفاده می‌شود در صورت انتخاب ارزش‌ها از داخل حافظه هارمونی پروسه صدای مجاور اجرا می‌شود. برای هر بردار جدید به‌دست 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 به‌دست آمده را مورد بررسی قرار می‌دهند،

$$R_i^{new} \leftarrow R_i^{new} \pm \text{rand} \times bw \quad [16]$$

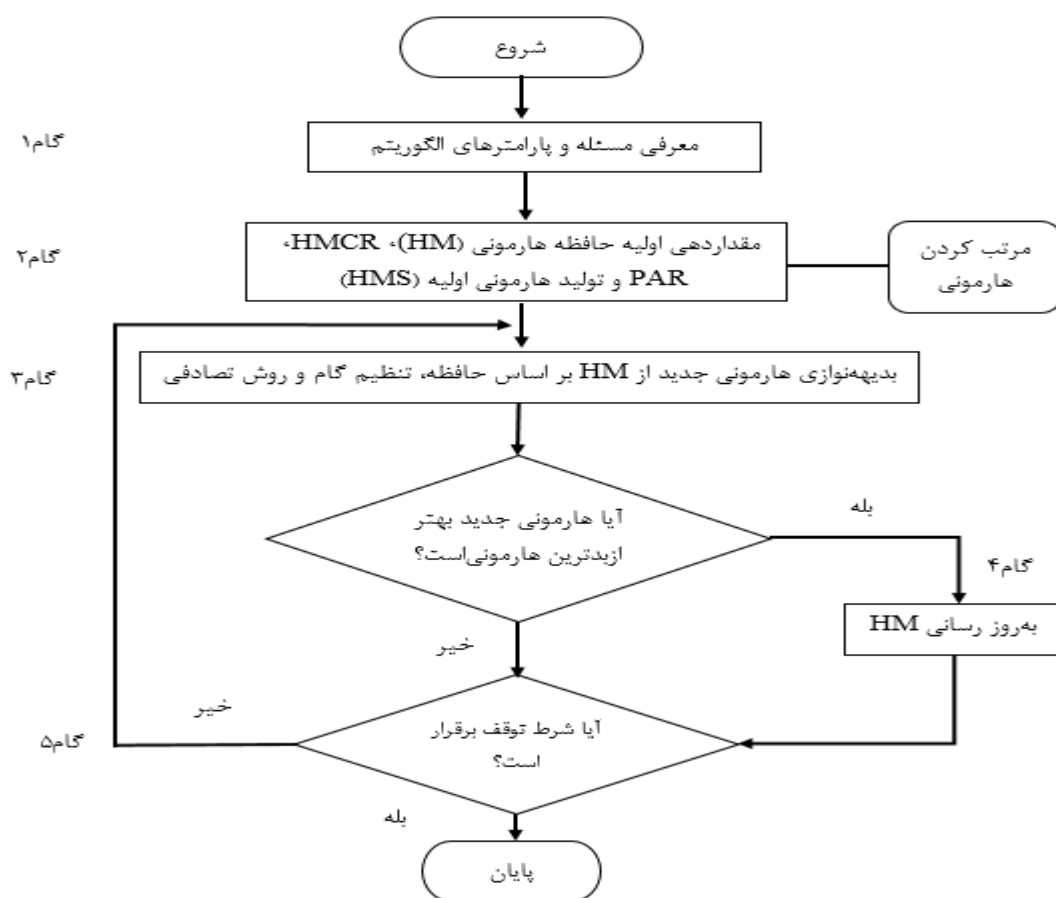
اما اگر جواب منفی باشد، با احتمال 1-PAR کاری انجام نمی‌دهد. bw فاصله اختیاری برای پهنای باند و rand() اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند.

گام چهارم: جدید کردن حافظه هارمونی

اگر هارمونی جدید تولید شده بهتر از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی باشد، جایگزین آن در حافظه می‌شود و هارمونی بدتر از حافظه خارج می‌شود. در غیر این‌صورت الگوریتم وارد تکرار بعدی می‌شود.

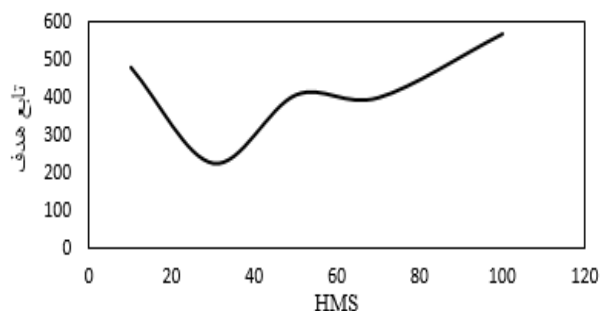
گام پنجم: بررسی معیار توقف

گام سوم و چهارم آنقدر تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود که در الگوریتم جستجوی هارمونی بررسی تعداد تکرار است. در صورت عدم برقراری شرط پایان گام سوم و چهارم مجدداً تکرار می‌گردد. البته می‌توان شرط پایان یافتن الگوریتم را بر مقدار بهینه مشخصی تنظیم نمود و تا یافتن آن مقدار مراحل الگوریتم را تکرار کرد. به این ترتیب، آخرین بردار به‌دست آمده در الگوریتم جواب مسئله است (جنت‌رستمی و همکاران



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم HS (لی و کیم ۲۰۰۴).

پارامترهای الگوریتم بعد از انجام تحلیل حساسیت در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۴ نحوه همگرایی الگوریتم در دوره بلندمدت (۴۸۰ ماه) برای رسیدن به جواب نشان داده شده است. تا تکرار ۵۰۰۰ تغییرات الگوریتم زیاد است و با سرعت بالایی تغییر می‌کند. سپس تا تکرار ۱۰۰۰۰ از میزان تغییرات کاسته شده و از تکرار ۱۰۰۰۰ به بعد تغییرات بسیار جزیی می‌شود. از این گام به بعد، سرعت الگوریتم کم شده و با سرعت کمتری به جواب بهینه همگرا می‌شود.



شکل ۳- تحلیل حساسیت مقدار HMS.

تحلیل حساسیت در روش HSA

تقریباً همه روش‌های فراکاشی به تغییر پارامترهای مورد استفاده در آنها حساس هستند که می‌توان با تحلیل حساسیت میزان تأثیر هر کدام از پارامترها را در جواب بهینه بررسی کرد. نتایج تحلیل حساسیت روی پارامتر HMCR نشان داد که مقادیر بزرگ این پارامتر سبب همگرایی سریع الگوریتم می‌شود. شکل ۳ تحلیل حساسیت را برای یافتن تعداد HMS بهینه نشان می‌دهد. با افزایش HMS ابعاد الگوریتم بزرگ شده و حجم محاسبات با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم بالا می‌رود و یا اینکه الگوریتم در بهینه محلی به دام افتاده و قادر به پیدا کردن جواب بهینه مناسب‌تری نبود بنابراین، با در نظر گرفتن مقدار ۳۰ برای HMS الگوریتم در زمان کمتر و با سرعت بیشتری به مقدار بهینه نزدیک شد. مقدار بهینه

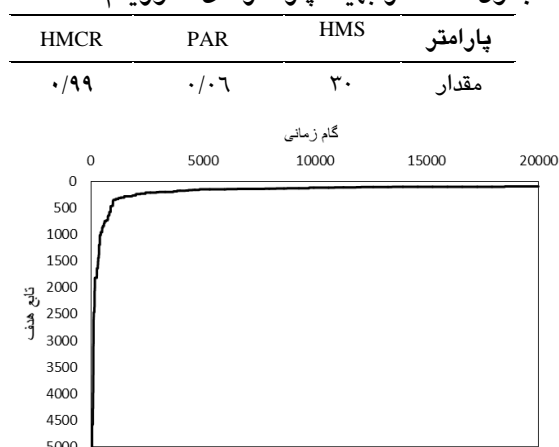
۱۹/۷۸۵۷ واحد محاسبه شد که ۸۷٪ با بهینه مطلق اختلاف داشت و به مراتب جواب بهتری نسبت به الگوریتم‌های HBMO و ACO ارائه داد. جدول ۴ درصد اختلاف هر کدام از روش‌های فوق را با مقدار بهینه مطلق حاصل از نرم‌افزار لینگو نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم HS

روش‌های بهینه‌سازی	درصد اختلاف روش‌ها با جواب بهینه مطلق حاصل از لینگو
HBMO	۱۲۷٪
ACO	۲۴۶٪
HSA	۸۷٪

با افزایش دوره‌های بهره‌برداری، تعداد متغیرهای تصمیم افزایش یافته و همگرایی به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه مشکل می‌گردد. شکل ۵ حجم رهاسازی به‌دست آمده از روش HSA و لینگو به همراه نیاز ماهانه را نشان می‌دهد، در بعضی از ماه‌ها که نمودار نیاز کشاورزی زیر نمودار رهاسازی است رهاسازی بیشتر از نیاز است و این به دلیل بالا بودن جریان ورودی به مخزن است و در بعضی از ماه‌ها که نمودار نیاز کشاورزی بالاتر از نمودار رهاسازی است کمبود داشته و رهاسازی نمی‌تواند مقدار نیاز را تأمین کند. شکل ۶ نیز حجم آب مخزن را در هر ماه و برای هر دو روش نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است مقدار رهاسازی و حجم مخزن به‌دست آمده از روش جستجوی هارمونی با لینگو مطابقت دارد و تغییرات حجم مخزن در طول دوره آماری در هر دو روش بین حداقل و حداکثر حجم مخزن قرار دارد.

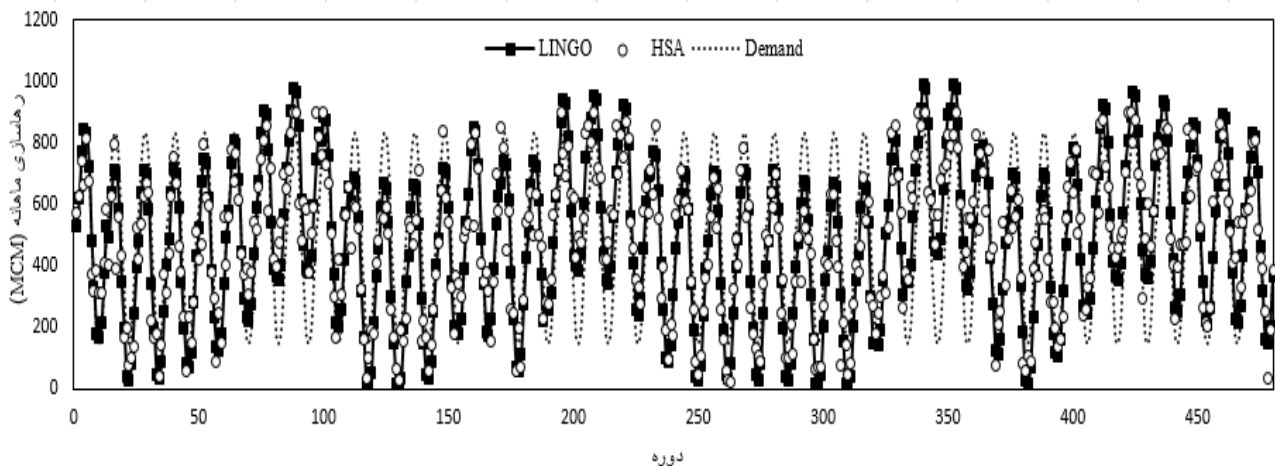
جدول ۳- مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم HS



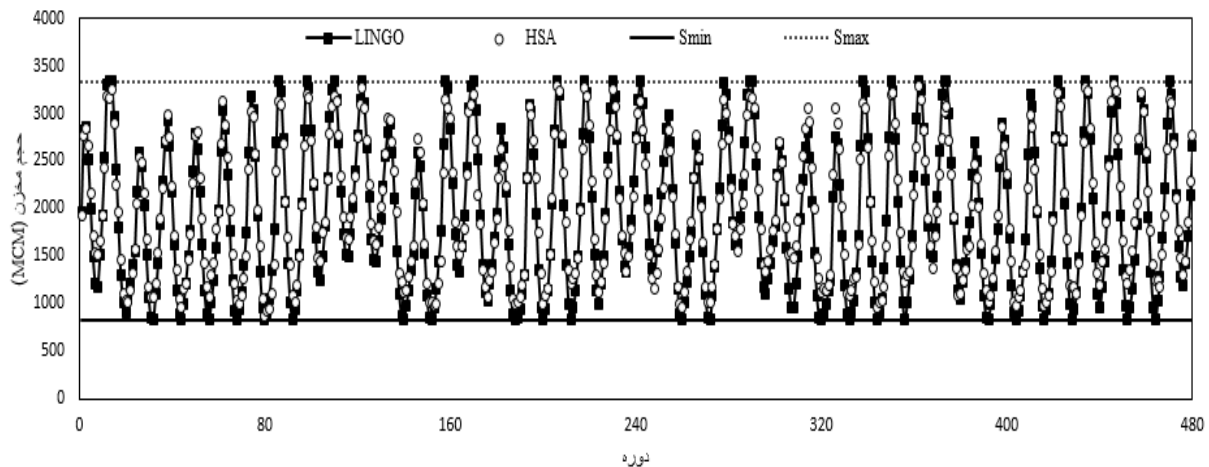
شکل ۴- نحوه همگرایی تابع هدف برای ۴۸۰ ماه (۱۹۹۰-۲۰۳۰).

بعد از اجرای برنامه، حتی در تکرارهای بالا جریمه صفر نمی‌شد که به دلیل قرار گرفتن بخشی از جواب‌های به‌دست آمده در محدوده جواب‌های نشدنی است. از میان قیود تعریف شده بیشترین تخطی مربوط به حجم ماکزیمم مخزن (P_2) بوده و در بعضی از ماه‌ها حجم ماکزیمم مخزن از ۳۳۴۰ بیشتر می‌شد. در نتیجه $C_2 = 1000$ و $C_1 = C_3 = C_4 = 10$ انتخاب شد. توان تابع جریمه نیز یک در نظر گرفته شد، زیرا بسیاری از جریمه‌ها کمتر از یک به‌دست می‌آمد که با انتخاب توان دو، جریمه کمتری برای آنها در نظر گرفته می‌شد.

مسئله تک مخزنه سد دز برای دوره ۴۰ ساله توسط برخی محققین مورد ارزیابی قرار گرفته است. بزرگ حداد (۲۰۰۵) این مسئله را با الگوریتم HBMO حل نمود. مقدار بهینه این مسئله توسط الگوریتم HBMO و پس از ۶۵۰۰۰ پرواز جفت‌گیری ۱۲۷٪ با بهینه مطلق اختلاف داشت. جلالی (۲۰۰۵) این مسئله را با استفاده از الگوریتم ACO با ۳۰۰ مورچه و ۵۰۰۰ تکرار حل نمود، که جواب حاصل از حل این مسئله ۲۴۶٪ با بهینه مطلق اختلاف داشت. در تحقیق حاضر مقدار بهینه مطلق تابع هدف با روش غیر خطی و توسط نرم‌افزار لینگو برابر با ۱۰/۵۵۵۲۵ واحد و با استفاده از HSA برابر با



شکل ۵- حجم رهاسازی به دست آمده از روش HSA و نرم افزار لینگو برای ۴۸۰ ماه (۱۹۹۰-۲۰۳۰).



شکل ۶- حجم آب مخزن به دست آمده از روش HSA و نرم افزار لینگو برای ۴۸۰ ماه (۱۹۹۰-۲۰۳۰).

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، قابلیت الگوریتم HS در حل مسئله بهره‌برداری مخزن برای دوره بلندمدت (۴۰ ساله) با پیچیدگی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. تابع هدف به صورت کمینه کردن مجذور شدت کمبودهای آب نسبی برای تأمین کشاورزی در یک دوره ۴۰ ساله است. هدف کمینه سازی کمبود آب در بخش کشاورزی در اراضی پایین دست سد دز می‌باشد. مقدار بهینه مطلق با نرم‌افزار لینگو محاسبه گردید و نتایج حاصل از HSA با الگوریتم‌های HBMO و ACO مقایسه و تعیین شد که HSA جواب بهتری نسبت به HBMO و ACO ارائه داده است. در بهینه‌سازی مخزن برای دوره

بلند مدت الگوریتم از سرعت همگرایی خوبی برخوردار بود که با توجه به ابعاد زیاد مسئله، الگوریتم جواب خوبی ارائه داد اما به انتخاب پارامترهای الگوریتم حساس است. همگرایی سریع و میزان نزدیکی به بهینه مطلق با توجه به ابعاد زیاد مسئله و تأمین نیاز کشاورزی در هر دوره موفقیت الگوریتم HS را در مسائل طراحی و مدیریت منابع آب برای دوره بلندمدت نشان داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که HSA از توانایی بالایی برای حل مسائل پیچیده بهره‌برداری سیستم‌های چند مخزنه و چند هدفه واقعی برخوردار می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- Abbass HA, 2001. MBO: Marriage in honey bees optimization A haplometrosis polygynous swarming approach. Pp. 207-214. Conference Evolutionary Computation. May 27-30, Seoul.
- Akbari- Alashti H, Soncini A, Dinpashoh Y, Fakheri- Fard A, Talataheri S, Bocchiola D, 2018. Operation of two major reservoirs of Iran under IPCC scenarios, during the XXI century. Hydrological Processes 32: 3254-3271.
- Bashiri H, Qaderi K, Rheinheimer D and Sharifi E, 2015. Application of harmony search algorithm to reservoir operation optimization. Water Resources Management 15: 5729-5748.
- Bazaraa MS, Sherali HD, Shetty CM, 2006. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms 3rd Edition. John Wiley and Sons, Hoboken. New Jersey.
- Borhani Dariane A and Mortazavi Naeini M, 2008. Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources. Journal of Water and Wastewater 68: 57-66. (In Persian)
- Bozorg Haddad O, 2005. HBMO (Honey Bees Mating Optimization) algorithm for hydrosystems optimization. PHD. Dissertation, Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- Cai X, McKinney DC and Lasdon LS, 2001. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. Advances in Water Resources 24: 667-676.
- Chen L, 2003. Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation. American Water Resources Association 39(5): 1157-1165.
- Dinpashoh Y, Sattari MT, Ebrahimi S and Darbandi S, 2016. Optimum operation of reservoirs using the Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (Case study: Alavian Dam). Water and Soil Science- University of Tabriz. 27(2): 17 – 29. (In Persian)
- Dorigo M, 1996. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems 26(1): 29-41.
- Fetanat A and Shafipour G, 2011. Generation maintenance scheduling in power systems using ant colony optimization for continuous domains based 0-1 integer programming. Expert Systems with Applications 8: 9729-9735.
- Geem ZW, 2000. Optimal design of water distribution networks using harmony search. PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University.
- Geem ZW, 2009. Harmony search optimization to the pump-included water distribution network design. Civil Engineering and Environmental Systems 6(3): 211-221.
- Glover F, Greenberg HJ, 1989. New Approaches for Heuristic Search: Linkage with artificial intelligence European. Journal of Operational Research 39: 119-130.
- Holland JH, 1975. Adaption in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Harbor, MI.
- Jalali MR, 2005. Optimum design and operation of hydrosystems by ant colony optimization algorithms; A new metaheuristic approach. PHD. Dissertation, Iran University of Science and Technology. (In Persian)
- Janat Rostami S, Kholghi M and Bozorg Haddad O, 2010. Management of reservoir operation system using improved harmony search algorithm. Water and Soil Science. University of Tabriz. 20/1: 61-71. (In Persian)
- Kennedy J and Eberhart R, 1995. Particle swarm optimization. Pp. 1942-1948. IEEE International Conference on_Nov/Dec 1995. 4. Washington, DC.
- Layeb A, 2013. A hybrid quantum inspired harmony search algorithm for 0-1 optimization problems. Journal of Computational and Applied Mathematics 253: 14-25.
- Lee KS and Geem ZW, 2004. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. Computers & structures 82: 781-798.
- Lee KS and Geem, ZW, 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.
- Lin Ch.Ch, Deng DJ 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.
- Mahdavi M, Fesanghary M and Damangir E, 2007. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. Applied Mathematics and Computation 188: 1567-1579.

- Mousavi SJ, Nakhaei P, Sadollah A and Kim JH, 2017. Optimization of hydropower storage projects using harmony search algorithm. Pp. 261- 270. In Harmony Search Algorithm- Proceedings of the 3rd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017). 22- 24 February. Bilbao, Spain. 514.
- Oliveira R and Loucks DP, 1997. Operating rules for multi reservoir system. Water Resources Research 33(4): 839-852.
- Olsen AL, 1994. Penalty functions and the knapsack problem. Pp. 554 – 558. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Proceedings of the First IEEE Conference on June 27-29, Orlando, FL, USA
- Rani D and Moreira MM, 2010. Simulation– optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. Water Resources Management 24:1107–1138.