

مقایسه روشهای جیره‌بندی در مدیریت مخازن در شرایط خشکسالی

فرزانه کرمی^۱

علیرضا برهانی داریان^۲

(دریافت ۹۱/۹/۶)

پذیرش ۹۲/۱/۲۱

چکیده

تهران با جمعیت سیزده میلیون نفر طی دو دهه گذشته شاهد کمبودهای شدید تأمین آب شرب بوده است. در چنین شرایطی استفاده بهینه از منابع آب موجود در چارچوب یک سیاست اصولی با اولویت‌بندی تأمین نیازهای مختلف آبی اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا استفاده از مدل‌های جیره‌بندی می‌تواند نقش مهمی در بهره‌برداری صحیح از منابع تأمین‌کننده آب تهران به‌خصوص در مواقع خشکسالی داشته باشد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی و مطالعه کاربرد روشهای مختلف جیره‌بندی و بررسی کارایی استفاده از الگوریتم‌های مختلف تکاملی برای حل این مسائل بود. برای این هدف، ابتدا مدل‌های بهره‌برداری یکپارچه از سیستم منابع آب تهران تدوین شد و سپس، کاربرد روشهای مختلف جیره‌بندی و نیز روشهای فراکاووشی حل مسائل سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، با استفاده از الگوریتم‌های فراکاووشی جستجوی هارمونی (HS و SGHS) رهاسازی بهینه از مخازن برای اهداف شرب و کشاورزی تعیین شد. در این راستا، بهینه‌سازی دراز مدت سیستم چند مخزنی بدون اتخاذ هرگونه سیاست بهره‌برداری و سپس با فرض سیاست جیره‌بندی صورت گرفت. در نهایت نتایج حاصل از این روشها با نتایج حاصل از روشهای دیگر و از جمله قانون فضای ذخیره (Space Rule) و WEAP مقایسه شد.

واژه‌های کلیدی: سیاست جیره‌بندی، بهره‌برداری یکپارچه، بهینه‌سازی، روش‌های فراکاووشی، WEAP

Comparison of Hedging Policies in Reservoir Management under Drought Condition

F. Karami¹

A.R. Borhani Darian²

(Received Aug. 27, 2012 Accepted March 26, 2013)

Abstract

Tehran, with a population of about thirteen million has experienced severe municipal water shortages during past two decades. Under these circumstances, optimum use of available water resources through establishing certain policies considering priorities of various water demands seems inevitable. In this regard, hedging models can play an important role in proper utilization of water resources in Tehran especially during drought periods. The main objective of this research is to investigate the application of different types of hedging policies and the efficiency of some of the evolutionary algorithms in solving these policies. For this purpose, first comprehensive and integrated water resources systems operation models were established and then the application of different types of hedging policies using heuristic methods was carried out. In the next step, the efficiency of Harmony Search algorithms including the original method (HS) and an improved version called SGHS was evaluated in solving these problems. In this regard, the optimization of long-term multiple reservoir system operation was carried out using hedging rules and another case without any operation rule for comparison purposes. Finally, the results were compared with those of other methods including the space rule and the WEAP software.

Keywords: Hedging Policies, Integrated Utilization, Optimization, Evolutionary Algorithms, WEAP.

1. M.Sc. Student of Water Resources, Khajeh Nasir University of Tech., Tehran
(Corresponding Author) (+98 21) 22326121 Farzane_krm@yahoo.com

2. Assoc. prof., Dept. of Civil Eng., Khajeh Nasir University of Tech., Tehran

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (نویسنده مسئول) ۲۲۳۲۶۱۲۱ (+۹۸ ۲۱) Farzane_krm@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

خشکسالی شامل یک دوره پیوسته و پایدار (از چند ماه تا چندین سال) است که در این دوره مقدار آب موجود در منابع آبی منطقه در حد قابل توجهی کاهش یافته و دچار کمبود می‌شود. لازم است با اتخاذ سیاست‌های بهینه در بهره‌برداری از منابع آب موجود به‌خصوص مخازن سدها، از بروز مسئله بحران آب جلوگیری شود. یکی از سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن، سیاست جیره‌بندی است که در آن با در نظر گرفتن میزان کمبود قابل قبولی در یک دوره طولانی مدت، از وقوع کمبود یکباره و شدید جلوگیری می‌شود. بهره‌بردار در این شرایط، تمام نیاز آن ماه را رها نمی‌کند و با ذخیره بخشی از آب در مخزن از به وجود آمدن کمبودی شدیدتر در ماههای آینده جلوگیری می‌کند. از جمله مزایای جیره‌بندی، کم شدن شدت کمبود بحرانی است ولی در مقابل، باعث افزایش تعداد شکست‌ها می‌شود.

باور و همکاران اولین کسانی بودند که به بررسی اقتصادی روشهای جیره‌بندی پرداختند [۱]. آنها خاطر نشان کردند که با توجه به غیرخطی بودن تابع خسارت نسبت به شدت کمبود، استفاده از سیاست‌های جیره‌بندی و در نتیجه کاهش شدت، بزرگ‌ترین کمبودی که در کل دوره اتفاق می‌افتد باعث کاهش خسارت وارد به سیستم می‌شود.

شی و رول روشهای جیره‌بندی تک نقطه‌ای و گسسته را معرفی نموده‌اند [۲ و ۳]. پس از آن، اسرینواسان و فیلیپوز ابتدا در سال ۱۹۹۶ با به‌کار بردن پارامتر ضریب جیره‌بندی^۱، روش دو نقطه‌ای را ابداع نموده و سپس در سال ۱۹۹۸، روابط بین روشهای مختلف جیره‌بندی و سطح ذخیره را بررسی کردند [۴ و ۵]. همچنین، دراپر و لاند، یو و کای و کلسته و بیلیم به بررسی و بهبود روش دو نقطه‌ای پرداخته‌اند [۶-۸].

از آن جا که مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب به لحاظ تنوع ضوابط تصمیم‌گیری و توابع هدف دارای پیچیدگی‌هایی است که بعضاً حل آنها با روشهای بهینه‌سازی معمول امکان پذیر نیست و یا مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است، بنابراین استفاده از ابزارهای نوین و روشهای جدید در حل این مسائل، امری اجتناب ناپذیر است.

گیم و همکاران در سال ۲۰۰۱، الگوریتم جستجوی هارمونی^۲ را بر مبنای پدیده "هارمونی موسیقی" ابداع کردند [۹]. پس از آن مهدوی و همکاران، عمران و مهدوی و پن و همکاران به ترتیب در سالهای ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با ایجاد تغییراتی در الگوریتم HS، الگوریتم‌های جدیدی با نام IHS، GHS و EHS ابداع کردند

[۱۰-۱۲]. فسانقری و همکاران در سال ۲۰۰۸ با ترکیب الگوریتم جستجوی موضعی^۳ و الگوریتم HS، روش جدیدی با نام HHS^۴ به وجود آوردند [۱۳]. در سال ۲۰۱۰، پن و همکاران بر اساس روش GHS و با اصلاحاتی به معرفی الگوریتم SGHS^۵ پرداختند [۱۴]. لازم به ذکر است که تمامی تحقیقات مربوط به جیره‌بندی به بررسی سیستم‌های ساده و تک مخزنی پرداخته‌اند. در این میان تنها کنسلیر و همکاران یک مخزن با دو منظور مصرف خانگی و کشاورزی را بررسی کرده‌اند پرداخته‌اند و در سایر مقالات صرفاً سیستم‌های تک منظوره بررسی شده است [۱۵]. همچنین در اغلب تحقیقات، از روشهای کلاسیک برای حل معادلات استفاده شده است. سیستم آبرسانی شهر تهران که در این مقاله به آن پرداخته شد، یک سیستم چند مخزنه چند منظوره است که از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است.

در این مقاله، کاربرد دو روش جیره‌بندی گسسته و دو نقطه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی هارمونی برای بهره‌برداری یکپارچه از سیستم چند مخزنه چندمنظوره شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آنها مقایسه شد.

۲- الگوریتم جستجوی هارمونی

در الگوریتم HS، هر جواب یک "هارمونی" نامیده شده و به صورت یک بردار نمایش داده می‌شود. جمعیت اولیه بردارهای جواب به صورت تصادفی تولید و در حافظه هارمونی^۶ ذخیره می‌شود. گام‌های مختلف این الگوریتم عبارت‌اند از:

۲-۱- مقداردهی اولیه به پارامترهای مدل و حافظه هارمونی

پارامترهای مدل عبارت‌اند از سایز حافظه هارمونی^۷ یا تعداد بردارهای جواب موجود در حافظه، نرخ سنجش حافظه هارمونی^۸، نرخ تنظیم دانه صدا^۹، پهنای باند^{۱۰} و تعداد تکرار. بدیهی است تنظیم مناسب این پارامترها سبب می‌شود در زمان کمتر جواب بهتری حاصل شود [۱۶]. حافظه هارمونی، گروهی از بهترین جوابها برای متغیرهای تصمیم مسئله است.

۲-۲- ایجاد یک هارمونی جدید

به‌منظور ایجاد هارمونی جدید، برای هر متغیر تصمیم، عددی تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. اگر این عدد بزرگ‌تر از

³ Sequential Quadratic Programming (SQP)

⁴ Hybrid Harmony Search (HHS)

⁵ Self-Adaptive Global-best Harmony Search (SGHS)

⁶ Harmony Memory (HM)

⁷ HMS

⁸ HMCR

⁹ PAR

¹⁰ Bw

¹ HF

² Harmony Search (HS)

$$b_w(t) = \begin{cases} b_{w,max} - \frac{b_{w,max} - b_{w,min}}{NI} * 2t, & \text{if } t < \frac{NI}{2} \\ b_{w,min} & , \text{if } t > \frac{NI}{2} \end{cases} \quad (2)$$

که در این رابطه NI تعداد کل تکرار، t شماره نسل و $b_{w,max}$ و $b_{w,min}$ ماکزیمم و می نیمم مقدار b_w است.

۳- مطالعه موردی

شکل ۱ نمودار شماتیک مسئله سیستم آبرسانی تهران را نشان می دهد. این سیستم شامل ۵ مخزن موازی و متوالی، ۵ جریان ورودی مستقل به مخزن شامل ۴ سرشاخه و ۱ جریان بین راهی، ۱ مجموعه چاه، ۳ منطقه نیاز کشاورزی و ۱ منطقه نیاز شرب شهر تهران است. در این سیستم، دو مخزن طالقان و کرج نسبت به تهران موازی عمل می کنند. مخزن لار مشکل فرار آب دارد به همین دلیل منطقی است که تا حد امکان، آب درون مخزن لار به سمت تهران بهره برداری شده و ذخیره نشود. به همین دلیل، بهره برداری این مخزن در مدل بهینه سازی، شرکت داده نشده و فقط براساس یک سیاست ثابت شبیه سازی صورت گرفته و خروجی آن تعیین می شود. این سیاست، برداشت آب با حداکثر ظرفیت کانال به منظور تأمین نیاز شرب تهران و پس از آن انتقال آب مازاد با حداکثر ظرفیت کانال به مخزن لتیان است.

مخزن لتیان و ماملو حالت خاصی به وجود می آورند که به پیچیدگی سیستم می افزاید. این دو مخزن از جهتی هم موازی و هم سری اند: یعنی از هر دو مخزن، کانال آبرسانی به تهران وجود دارد که به شکل موازی عمل می کند. ضمن اینکه مخزن ماملو در پایین دست مخزن لتیان است و سرریز و آب رها شده اضافی از لتیان، توسط مخزن ماملو جمع آوری شده و برای تأمین بخشی از نیازهای شرب تهران و کشاورزی ورامین استفاده خواهد شد. جریان ورودی به لتیان برابر مجموع جریان ورودی از رودخانه جاجرود و آب انتقالی از لار به لتیان است و جریان ورودی به ماملو برابر با مجموع جریان ورودی از شاخه رودخانه دماوند، جریان بین راهی و خروجی از لتیان است. سیاستی که در بهره برداری از این دو مخزن اعمال شد، به این صورت است که خروجی از لتیان ابتدا با حداکثر ظرفیت به تهران منتقل می شود و در صورت وجود خروجی، مازاد بر ظرفیت به مخزن ماملو انتقال می یابد. پس از آنکه میزان خروجی از هر مخزن توسط ضرایب مشخص شد، در اولویت نخست، آب شرب تهران تأمین می شود. همچنین در این مقاله

HMCR بود. هارمونی جدید به صورت تصادفی از بین تمام جوابهای مجاز انتخاب می شود و در غیر این صورت، هارمونی جدید از میان مقادیر موجود در حافظه انتخاب می شود. شبه کد مربوط به ایجاد هارمونی جدید در ادامه آورده شده است:

(۱)

```
For each  $i \in [1, N]$  do
  If  $u(0,1) \leq HMCR$  then
     $x_i = x_i^j \pm j \cdot U(1, \dots, HMS)$ 
  If  $u(0,1) \leq PAR$  then
     $x_i = x_i \pm b_w \cdot \text{Random}$ 
  end if
else
   $x_i = LB_i + r \cdot (UB_i - LB_i)$ 
end if
end for
```

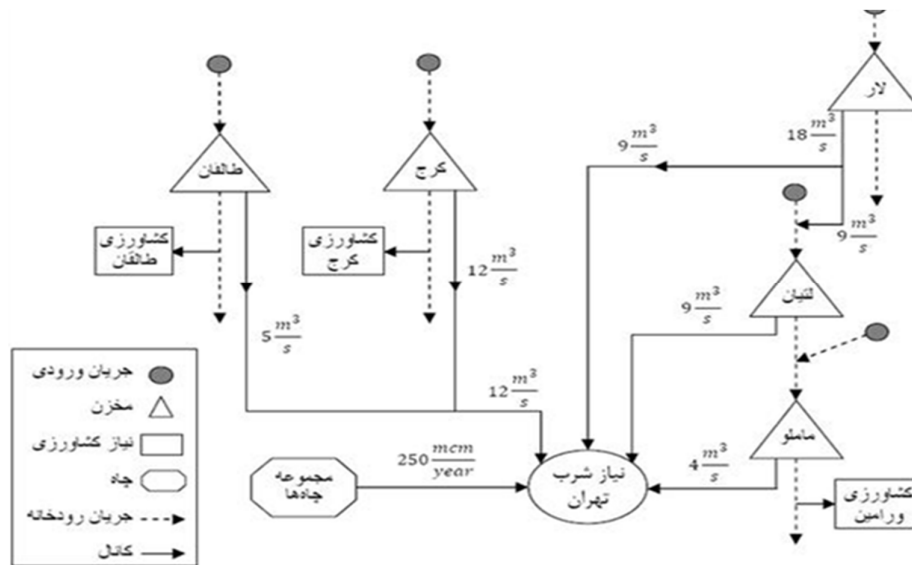
در این شبه کد UB_i و LB_i حد بالا و پایین هر متغیر تصمیم، b_w پهنای باند مجاز، HMCR نرخ سنجش حافظه هارمونی، PAR نرخ تنظیم دانگ صدا و Random و r یک عدد تصادفی بین صفر و یک است.

۳-۲- مقایسه هارمونی جدید با هارمونی های ذخیره شده در HM
اگر هارمونی جدید ساخته شده بهتر از بدترین جواب ذخیره شده در حافظه بود، این هارمونی جایگزین بدترین جواب در HM می شود. در نهایت جوابهای موجود در حافظه بر اساس میزان مطلوبیت (مقدار تابع هدف) مرتب می شود.

۴-۲- شرط پایانی

تا زمانی که شرط پایانی (به طور مثال بیشینه تعداد تکرار) ارضا نشده، گامهای قبل تکرار می شود.

در الگوریتم HS، پارامترهای مدل در ابتدا فرض شده و در طول برنامه، ثابت هستند. در الگوریتم SGHS، این پارامترها دینامیک فرض شده و در طول برنامه تغییر می کند. در این الگوریتم فرض بر آن است که HMCR و PAR به ترتیب در محدوده های $[0, 1]$ و $[0.9, 1]$ ، توزیع نرمال دارند. ابتدا مقادیر میانگین HMCR و PAR 0.98 و 0.9 فرض می شوند. سپس با مقادیر انحراف معیار 0.01 و 0.05 تابع نرمالی برآزش داده شده و مقادیر HMCR و PAR از روی آن استخراج می شود. پس از یک تعداد مشخص تکرار، مقادیر میانگین HMCR و PAR استفاده شده در این دوره تکرار محاسبه می شود. با استفاده از مقادیر انحراف معیار 0.98 و 0.9 و مقادیر میانگین جدید، توابع نرمال جدیدی برآزش داده می شود. سپس مقادیر HMCR و PAR برای تکرار بعدی از روی این توابع به دست می آید. این روند تا انتهای برنامه تکرار می شود. همچنین b_w در طول برنامه به صورت زیر تعریف شده و تغییر می کند



شکل ۱- شماتیک مسئله سیستم آبرسانی تهران

سالانه از چاهها می‌تواند تا سقف ۲۵۰ م.م.م. افزایش یابد [۱۷]. لازم به ذکر است این مدل برای ۴۷ سال داده مشاهداتی (از سال آبی ۳۸-۱۳۳۷ لغایت ۸۴-۱۳۸۳) اجرا شد که میانگین ماهانه جریان ورودی به مخازن و میزان نیاز برای بخشهای مختلف به ترتیب در جدولهای ۱ و ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است این داده‌ها از گزارش اصفهانی در سال ۱۳۹۰ برداشته شده است [۱۸].

حداکثر میزان برداشت مجاز سالانه از چاهها ۲۵۰ میلیون مترمکعب (م.م.م.) فرض شد. بر اساس بررسی آمار برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی در دشت تهران، فرض بر این است که تا سقف ۱۲۰ م.م.م. در سال (ماهانه ۱۰ م.م.م.) در اولویت اول و همراه با مخازن سطحی از چاهها برداشت شود اما در صورتی که کمبود آب به وجود آمده و مخازن نتواند آن را جبران نماید، برداشت

جدول ۱- میانگین ماهانه جریان ورودی به مخازن و ظرفیت مخازن (میلیون مترمکعب)

مخزن	ماه											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
طالقان	۱۰	۱۴	۱۳	۱۲	۱۳	۲۴	۷۹	۱۳۹	۹۹	۳۹	۱۷	۱۰
کرج	۱۳	۱۵	۱۴	۱۲	۱۳	۲۳	۵۸	۹۳	۷۸	۴۵	۲۴	۱۶
لتیان	۹	۱۳	۱۳	۱۳	۱۵	۳۰	۷۳	۸۴	۴۹	۲۱	۱۲	۹
ماملو	۴	۶	۶	۵	۶	۱۳	۲۹	۳۴	۱۹	۷	۴	۳
لار	۱۵	۱۳	۱۱	۱۰	۹	۱۰	۴۰	۱۱۰	۱۰۶	۵۱	۲۹	۲۱
مجموع	۵۱	۶۰	۵۶	۵۱	۵۶	۱۰۰	۲۷۸	۴۵۹	۳۵۱	۱۶۴	۸۵	۵۹

جدول ۲- میانگین ماهانه نیاز در بخشهای مختلف (میلیون مترمکعب)

منطقه نیاز	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	سالانه
تهران	۸۵	۸۰	۷۸	۷۸	۷۸	۷۸	۷۷	۸۴	۹۳	۱۰۰	۱۰۱	۹۶	۱۰۳۰
کشاورزی طالقان	۱۰	۴	۰	۳	۳	۷	۲۸	۴۱	۵۴	۶۶	۶۲	۳۳	۳۱۰
کشاورزی کرج	۳	۱	۰	۱	۱	۲	۸	۱۲	۱۶	۲۰	۱۸	۱۰	۹۲
کشاورزی ورامین	۵	۶	۳	۴	۸	۱۶	۴۰	۵۷	۵۲	۵۱	۳۵	۱۸	۲۹۵
مجموع	۱۰۴	۹۱	۸۱	۸۵	۹۰	۱۰۶	۱۵۳	۱۹۵	۲۱۵	۲۳۶	۲۱۶	۱۵۷	۱۷۲۷

۴- ساختار مدل

هدف از این مدل، حداقل کردن کل کمبود شهر تهران بود. تابع هدف این سیستم به صورت یک تابع خسارت مطابق رابطه ۳ تعریف شده است. در این تابع، هدف نیاز شرب و کشاورزی به صورت هم‌سنگ در نظر گرفته شده‌اند ولی در ساختار مدل، اولویت اول با تأمین آب شرب است و در صورتی که آب مازاد بر نیاز شرب وجود داشته باشد، به بخش کشاورزی هدایت می‌شود.

(۳)

$$\sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^T (TD_{Teh}(y,t) - R_{Teh}(y,t))^2 + \sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^T \sum_{c=1}^2 (TD_{ag}(y,t,c) - R_{ag}(y,t,c))^2$$

که در این رابطه

$TD_{Teh}(y,t)$ نیاز شرب تهران در سال y و دوره t ، $R_{Teh}(y,t)$ مجموع آب تأمین شده از منابع مختلف برای شهر تهران در سال y و دوره t ، c شماره منطقه نیاز کشاورزی، $TD_{ag}(y,t,c)$ نیاز منطقه کشاورزی و $R_{ag}(y,t)$ مجموع آب رهاسازی شده به مناطق کشاورزی است. لازم به ذکر است در ابتدا نیاز از هر مخزن برابر با حداکثر ظرفیت کانال انتقالی از هر مخزن به تهران در نظر گرفته شد.

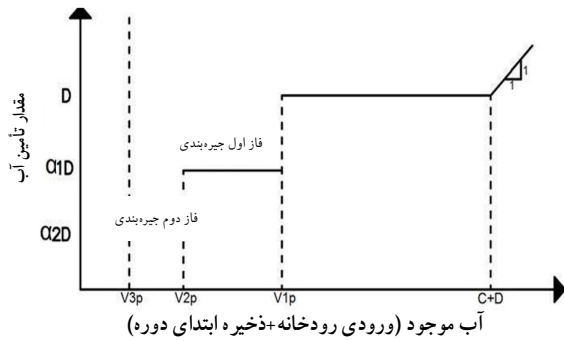
مراحل تدوین و استفاده از مدل بهره‌برداری بهینه برای دو روش جیره‌بندی گسسته و دو نقطه‌ای برای این سیستم به شرح زیر است:

۴-۱- گام اول: مقدار دهی اولیه به پارامترها و تشکیل حافظه هارمونی ابتدا پارامترهای مدل به صورت زیر فرض می‌شوند و سپس حافظه هارمونی به صورت تصادفی تشکیل می‌شود:

$$HMS=10 \quad HMCR=0.995 \quad PAR=30 \quad BW=1$$

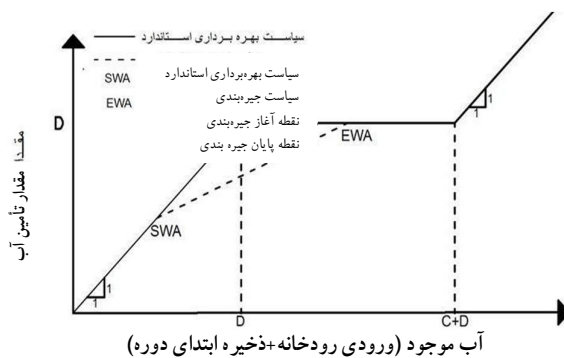
همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، در روش جیره‌بندی گسسته، هرگاه مجموع ذخیره و آورد رودخانه برای هر ماه مشخص p بیشتر از V_{1P} شود، تمامی نیاز تأمین می‌شود. اما اگر مجموع ذخیره و آورد رودخانه کمتر از V_{1P} و بیشتر از V_{2P} شود تنها مقدار α_1 درصد از نیاز، تأمین می‌شود که به آن فاز اول جیره‌بندی گفته می‌شود و به همین ترتیب اگر مجموع ذخیره و آورد رودخانه کمتر از V_{2P} و بیشتر از V_{3P} شود، α_2 درصد از نیاز تأمین می‌شود که به آن فاز دوم جیره‌بندی می‌گویند. مقادیر V_{1P} و V_{2P} متغیرهای تصمیم بوده و حافظه هارمونی را تشکیل می‌دهند.

در روش جیره‌بندی دو نقطه‌ای، اگر مقدار ذخیره اولیه به اضافه آورد رودخانه منهای تبخیر و نیاز، از مقدار ظرفیت مخزن بیشتر شود، به معنی سرریز است و مقدار آب رها شده مانند روش SOP



شکل ۲- روش جیره‌بندی گسسته

محاسبه می‌شود (شکل ۳). در شرایطی که مقدار این عبارت عددی بین صفر و ظرفیت مخزن باشد، سه حالت اتفاق می‌افتد: در حالت اول، اگر ذخیره به اضافه آورد رودخانه منهای تبخیر بیشتر از EWA باشد در این صورت برابر با مقدار نیاز آب رها می‌شود (حالت عادی)؛ در حالت دوم، اگر این مقدار بین دو حد SWA و EWA (نقطه شروع و پایان جیره‌بندی) قرار بگیرد، از روی خط جیره‌بندی، آب رها می‌شود؛ در حالت سوم، اگر مقدار یاد شده، عددی کمتر از SWA شود، در این صورت هر مقدار آبی که در سیستم هست، رها می‌شود. در این روش SWA و EWA متغیرهای تصمیم بوده و حافظه هارمونی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳- روش جیره‌بندی دو نقطه‌ای

۴-۲- گام دوم: بررسی معادله پیوستگی برای هر مخزن ابتدا مقدار آب موجود محاسبه می‌شود و سپس بر اساس اینکه در ناحیه جیره‌بندی واقع می‌شود یا خیر، مقدار خروجی از مخزن محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر α_1 و α_2 در روش جیره‌بندی گسسته با تحلیل حساسیت به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۶ به دست آمده‌اند.

۴-۳- گام سوم: محاسبه آب انتقال یافته به تهران در این مرحله در صورتی که آب هدایت شده به سمت تهران بیشتر از نیاز شرب باشد، مقدار مازاد به سمت مناطق کشاورزی منتقل

می‌شود و در صورتی که کمتر از آن مقدار باشد، مقدار کمبود تا سقف مجاز از چاهها برداشت می‌شود.

۴-۴- گام چهارم

محاسبه تابع برآزش، تشکیل حافظه جدید با توجه به قوانین الگوریتم جستجوی هارمونی و مقایسه نتایج با بدترین نتیجه موجود در حافظه و به هنگام کردن حافظه.

۴-۵- گام پنجم

تکرار گام‌های ۲ تا ۴، تا رسیدن به شرط پایان مسئله.

۵- نتایج کاربرد مدل‌ها

از آنجا که احتمال می‌رود تعیین تعداد فازهای جیره‌بندی در نتایج مدل‌ها تأثیرگذار باشد، ابتدا نسبت به مشخص نمودن بهینه تعداد فازهای جیره‌بندی بر اساس تابع هدف و معیارهای ارزیابی اقدام

شد. برای این کار عملکرد مدل جیره‌بندی گسسته با تعداد فازهای متفاوت به دو روش بهینه‌سازی HS و SGHS مورد بررسی قرار گرفت تا از این طریق تعداد بهینه فازهای جیره‌بندی به دست آید. همان‌طور که در جدولهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، در هر دو روش بهینه‌سازی HS و SGHS بیشترین اعتمادپذیری و کمترین آسیب‌پذیری مربوط به حالت جیره‌بندی با سه فاز است. به این ترتیب در مدل گسسته، این تعداد مورد استفاده قرار گرفت.

برای مقایسه عملکرد مدل‌های جیره‌بندی از نتایج چند روش دیگر از جمله Space Rule، بهینه‌سازی آزاد سیستم بدون اعمال سیاست بهره‌برداری خاص و استفاده از روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی (HS-opt)، و نتایج نرم‌افزار شبیه‌سازی جامع (WEAP (2011) استفاده شده است [۱۷]. در روش HS-opt مسیر بهینه بهره‌برداری سیستم با گام ماهانه و در طی سالهای آماری (۴۷ سال) برای هر بخش مصرف و از هر مخزن و منبع آبی مشخص می‌شود. در این

جدول ۳- مقایسه سیاست جیره‌بندی گسسته بر مبنای تعداد فازهای جیره‌بندی متفاوت - HS

تعداد فازها	اعتماد پذیری		آسیب پذیری میانگین		آسیب پذیری حداکثر		تابع هدف	
	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی
۲ فاز جیره‌بندی	۰/۶۹	۰/۴۸	۰/۱۰	۰/۷۵	۰/۲۴	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۱
۳ فاز جیره‌بندی	۰/۷۰	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۷۴	۰/۲۲	۰/۹۵	۰/۰۱	۰/۳۱
۴ فاز جیره‌بندی	۰/۶۹	۰/۴۶	۰/۱۰	۰/۷۵	۰/۲۴	۰/۹۸	۰/۰۱	۰/۳۲
۵ فاز جیره‌بندی	۰/۶۹	۰/۴۰	۰/۱۱	۰/۷۵	۰/۲۵	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۲
۶ فاز جیره‌بندی	۰/۶۸	۰/۴۰	۰/۱۱	۰/۷۷	۰/۲۶	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۲

جدول ۴- مقایسه سیاست جیره‌بندی گسسته بر مبنای تعداد فازهای جیره‌بندی متفاوت - SGHS

تعداد فازها	اعتماد پذیری		آسیب پذیری میانگین		آسیب پذیری حداکثر		تابع هدف	
	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی
۲ فاز جیره بندی	۰/۷۰	۰/۴۷	۰/۰۹	۰/۷۴	۰/۲۶	۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۳۱
۳ فاز جیره بندی	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۰۸	۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۹۵	۰/۰۱	۰/۳۱
۴ فاز جیره بندی	۰/۷۰	۰/۴۷	۰/۱۰	۰/۷۶	۰/۲۶	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۲
۵ فاز جیره بندی	۰/۶۹	۰/۴۶	۰/۱۱	۰/۷۶	۰/۲۵	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۲
۶ فاز جیره بندی	۰/۶۸	۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۷۷	۰/۲۶	۱/۰۰	۰/۰۱	۰/۳۲

جدول ۵- مقادیر تابع هدف (m³)

منطقه نیاز	two point		discrete		HS-opt	WEAP	Space Rule
	HS	SGHS	HS	SGHS			
شرب تهران	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۳
کشاورزی	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱۲
مجموع	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۵

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مربوط به شهر تهران

روش	اعتماد پذیری		آسیب پذیری میانگین		آسیب پذیری حداکثر	
	شرب تهران	کشاورزی	شرب تهران	کشاورزی	شرب تهران	کشاورزی
HS	۰/۶۶	۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۷۱	۰/۳۶	۰/۹۰
SGHS	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۱۸	۰/۷۴	۰/۲۳	۰/۹۸
HS	۰/۷۰	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۷۴	۰/۲۲	۰/۹۵
SGHS	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۰۸	۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۹۵
WEAP	۰/۷۱	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۹۰	۰/۶۰	۱/۰۰
Space Rule	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۲۹	۰/۹۵	۰/۵۹	۱/۰۰
HS-opt	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۸۸	۰/۴۸	۰/۹۹

همان طور که در جدول ۶ مشاهده می شود اعتماد پذیری، آسیب پذیری میانگین و حداکثر روش جیره بندی کمتر از اعتماد پذیری، آسیب پذیری میانگین و حداکثر روشهای HS-opt، Space Rule و نرم افزار WEAP است. این مطلب با فلسفه جیره بندی که افزایش تعداد شکست ها و کاهش حداکثر کمبود است، کاملاً منطبق است. شایان ذکر است هدف از جیره بندی در بهره برداری از مخازن، کاهش آسیب پذیری حداکثر و در نتیجه کاهش خسارت ناشی از یک کمبود شدید است. زیرا رابطه کمبود و خسارت یک رابطه ی غیر خطی است و مقدار خسارت در کمبودهای بالاتر با افزایش اندک در مقدار کمبود، به میزان بیشتری افزایش می یابد. همچنین، با توجه به نتایج هر دو جدول ۵ و ۶ می توان نتیجه گرفت که روش بهینه سازی SGHS بهتر از روش HS عمل می کند و این برتری به دلیل ثابت نبودن مقادیر PAR، HMCR و Bw در طول برنامه در روش SGHS است.

در بین روشهای مختلف، نتایج مدل شبیه سازی WEAP و سپس Space Rule در معیارهای آسیب پذیری مربوط به تأمین آب شرب تهران از بقیه ضعیف تراند. بهترین آسیب پذیری میانگین شرب تهران مربوط به مدل جیره بندی گسسته با روش حل SGHS و بدترین آن همان طور که ذکر شد مربوط به WEAP است. بهترین آسیب پذیری حداکثر شرب تهران مربوط به جیره بندی گسسته با روش حل HS و بدترین آن مربوط به WEAP است. مدل های جیره بندی گسسته در معیار آسیب پذیری در مجموع بهتر از روش جیره بندی دو نقطه ای می باشند. اما با این وجود در آسیب پذیری حداکثر نمی توان برتری مشخصی از دو روش HS و SGHS نسبت به هم مشاهده نمود.

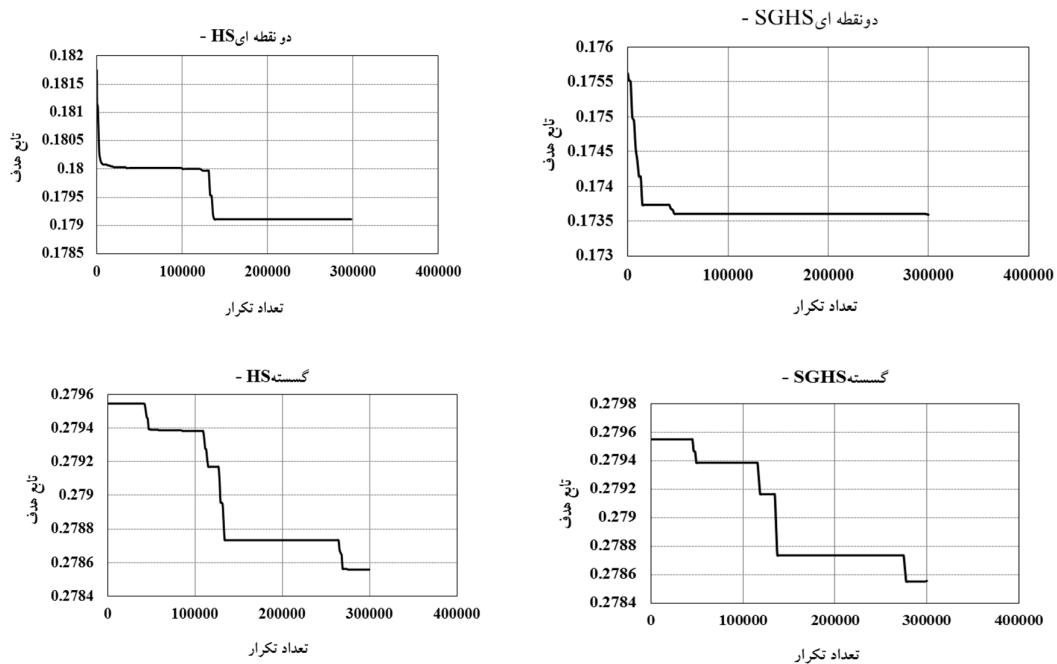
نمودارهای همگرایی این مدل ها که از میانگین ۱۰ اجرا به دست آمده اند، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، روش دو نقطه ای نسبت به روش گسسته، و مدل SGHS نسبت به HS سریع تر همگرا شده است و بنابراین در زمانی کمتر به نتیجه ای بهتر رسیده است. در هر دو روش جیره بندی برای استفاده عملی از مدل های جیره بندی، نیاز به آورد رودخانه در دوره فعلی (Q_t) است [۳ و ۴]. با توجه به نامعلوم بودن این مقدار در ابتدای

روش سیاست خاصی اعمال نشده و از این جنبه محدودیتی به سیستم تحمیل نمی شود. لازم به ذکر است تمامی نتایج ذکر شده، میانگین نتایج ۱۰ اجرا بوده است [۱۷].

نتایج مربوط به مقدار تابع هدف مسئله به تفکیک روشهای مختلف، در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج این جدول و همان طور که انتظار می رود، کمترین مقدار تابع هدف مربوط به نتایج بهینه سازی جستجوی هارمونی بدون اعمال سیاست بهره برداری خاص (HS-opt) است. در مورد دو روش جیره بندی مورد بحث، همان طور که مشاهده می شود، روش دو نقطه ای در تابع هدف بهتر از روش گسسته عمل نموده است. نمودارهای همگرایی این مدل ها که از میانگین ۱۰ اجرا به دست آمده اند، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، روش دو نقطه ای نسبت به روش گسسته و مدل SGHS نسبت به HS سریع تر همگرا شده است و بنابراین در زمانی کمتر به نتیجه ای بهتر رسیده است.

نتایج مربوط به معیارهای ارزیابی شهر تهران شامل اعتماد پذیری، آسیب پذیری میانگین و آسیب پذیری حداکثر در جدول ۶ آورده شده است. اعتماد پذیری نسبت تعداد دوره هایی که در این دوره ها نیاز به طور کامل تأمین شده باشد به تعداد کل دوره ها است. آسیب پذیری حداکثر سالانه نشان دهنده میزان حداکثر شدت کمبود اتفاق افتاده در تمامی دوره شبیه سازی است. بنابراین هر چه این مقدار کمتر باشد، میزان بروز شکست های بزرگ در سیستم کمتر خواهد شد. آسیب پذیری میانگین از میانگین آسیب پذیری حداکثر ماهانه محاسبه می شود و تحلیلی مشابه آسیب پذیری حداکثر سالانه دارد. آسیب پذیری با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می شود. نتایج نشان می دهد که اعتماد پذیری روش گسسته بیشتر و آسیب پذیری میانگین و حداکثر آن کمتر از روش دو نقطه ای است. بنابراین روش گسسته از این نظر بهتر عمل می کند [۵].

$$\text{آسیب پذیری} = \frac{TD_t - R_t}{TD_t} \quad (4)$$



شکل ۴- نمودار همگرایی مدل‌ها

جدول ۷- نتایج مربوط به تأثیر آورد رودخانه در محاسبات HS

مجموع	تابع هدف		آسیب پذیری حداکثر		آسیب پذیری میانگین		اعتماد پذیری		شرایط سیستم
	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۷	۰/۲۱	۰/۷۵	۰/۰۸	۰/۴۸	۰/۷۰	بدون در نظر گرفتن آورد رودخانه
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۵	۰/۲۲	۰/۷۴	۰/۱۰	۰/۴۹	۰/۷۰	با در نظر گرفتن آورد همان ماه
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۲۴	۰/۷۶	۰/۰۹	۰/۴۵	۰/۷۱	با در نظر گرفتن آورد ماه قبل

جدول ۸- نتایج مربوط به تأثیر آورد رودخانه در محاسبات SGHS

مجموع	تابع هدف		آسیب پذیری حداکثر		آسیب پذیری میانگین		اعتماد پذیری		شرایط سیستم
	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۲۱	۰/۷۶	۰/۰۷	۰/۴۸	۰/۷۰	بدون در نظر گرفتن آورد رودخانه
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۵	۰/۲۵	۰/۷۲	۰/۰۸	۰/۴۸	۰/۷۱	با در نظر گرفتن آورد همان ماه
۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۲۲	۰/۷۶	۰/۰۹	۰/۴۹	۰/۷۲	با در نظر گرفتن آورد ماه قبل

همان دوره مدل‌سازی شده است. به این ترتیب که در محور افقی شکل ۲، تنها ذخیره ابتدای دوره منظور شده است. نتایج برای مقایسه این سه حالت (با در نظر گرفتن آورد رودخانه در دوره فعلی، بدون در نظر گرفتن آن در محاسبات و جایگزینی آورد دوره قبل) در جدولهای ۷ و ۸ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حذف یا استفاده از آورد دوره قبل تأثیر زیادی بر نتایج نگذاشته است و حتی حذف آن به بهبود آسیب‌پذیری‌های حداکثر و

دوره، این خود مستلزم داشتن یک مدل پیش‌بینی با گام حداقل یک ماهه است که می‌تواند خطاهای پیش‌بینی را وارد مسئله کند. لذا در اینجا امکان استفاده از مدل‌های جیره‌بندی بدون داشتن ترم جریان ورودی به مخزن در دوره فعلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور روش جیره‌بندی گسسته با استفاده از دو روش بهینه‌سازی HS و SGHS برای شهر تهران، یک بار با حذف آورد رودخانه از محاسبات و بار دیگر با در نظر گرفتن آورد دوره قبل به‌جای آورد

میانگین شرب تهران در هر دو مدل منجر شده است. همچنین، در نظر گرفتن آورد دوره قبل به جای آورد همان دوره سبب افزایش اندکی در اعتمادپذیری و به همان نسبت در آسیب پذیری‌ها می‌شود. بنابراین، با توجه به قطعی نبودن جریان رودخانه و اثرگذاری اندک آن در نتایج، می‌توان آن را از محاسبات مربوط به آب موجود در سیاست‌های جیره‌بندی حذف کرد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به معیارهای ارزیابی، در هر دو روش بهینه‌سازی HS و SGHS، سه فاز برای جیره‌بندی گسسته به‌عنوان حالت بهینه به دست آمد. پس از آن به مقایسه دو روش جیره‌بندی گسسته و دو نقطه‌ای و دو روش بهینه‌سازی HS و SGHS پرداخته شد. اگر معیار مقایسه، مقدار تابع هدف در نظر گرفته شود، با توجه به آنکه مسئله کمیته‌سازی است، روش دو نقطه‌ای بهتر از روش گسسته جواب می‌دهد اما با توجه به معیارهای ارزیابی که شامل اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری است، روش گسسته جواب بهتری می‌دهد. در هر دو روش جیره‌بندی گسسته و دو نقطه‌ای، روش بهینه‌سازی SGHS به دلیل دینامیک در نظر گرفتن پارامترها، در معیار تابع هدف بهتر از روش HS جواب می‌دهد. در نهایت نتایج

این ۴ مدل با مدل‌های Space Rule، مدل بهینه‌سازی آزاد با روش HS و نرم‌افزار WEAP مقایسه شد. در بین روشهای مختلف نتایج مدل شبیه‌سازی WEAP و سپس Space Rule در معیارهای آسیب‌پذیری مربوط به تأمین آب شرب تهران از بقیه ضعیف‌تر به دست آمد. بهترین آسیب‌پذیری میانگین شرب تهران مربوط به مدل جیره‌بندی گسسته با روش حل SGHS و بدترین آن مربوط به WEAP بود. بهترین آسیب‌پذیری حداکثر شرب تهران مربوط به جیره‌بندی گسسته با روش حل HS و بدترین آن مربوط به WEAP بود. مدل‌های جیره‌بندی گسسته در معیار آسیب‌پذیری در مجموع بهتر از روش جیره‌بندی دو نقطه‌ای است. اما با این وجود در آسیب‌پذیری حداکثر نمی‌توان برتری مشخصی از دو روش HS و SGHS نسبت به هم مشاهده نمود.

در آخر نیز مقایسه‌ای برای در نظر گرفتن یا صرف نظر کردن از مقدار آورد رودخانه در روش جیره‌بندی گسسته انجام شد. نتایج نشان داد که حذف جریان ورودی در دوره فعلی و یا استفاده از جریان دوره قبل، تأثیر محسوسی بر نتایج نگذاشته است و حتی به بهبود آسیب‌پذیری‌های حداکثر و میانگین شرب تهران در هر دو مدل منجر شده است. بنابراین، با توجه به قطعی نبودن جریان رودخانه بهتر است صرفاً از ذخیره ابتدای دوره در مدل استفاده شود.

۷- مراجع

1. Bower, B. T., Hufschmidt, M. M., and Reedy, W. W. (1962). "Operating procedures: Their role in the design of water-resources systems by simulation analyses." Maass et al. (Eds), *Design of Water Resources Systems*, Harvard University Press, Cambridge, M.A.
2. Shih, J.S., and Revelle, C. (1994). "Water supply operation during drought: Continuous hedging rule." *J. of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 613-629.
3. Shih, J.S., and ReVelle, C. (1995). "Water supply operation during drought: A discrete hedging rule." *European Journal of Operational Research*, 82, 163-175.
4. Srinivasan, K., and Philipose, M.C. (1996). "Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation." *Water Resources Management*, 10, 163-188.
5. Srinivasan, K., and Philipose, M.C. (1998). "Effect of hedging on over year reservoir performance." *Water Resources Management*, 12, 95-120.
6. Draper, A.J., and Lund, J.R. (2004). "Optimal hedging and carryover storage value." *J. of Water Resources Planning and Management*, 130, 83-87.
7. You, J.Y., and Cai, X. (2008). "Determining forecast and decision horizons for reservoir operations under hedging policies." *Water Resource Research*, 44, W11430, doi:10.1029/2008WR006978.
8. Celeste, A.B., and Billib, M. (2009). "Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models." *Advances in Water Resources*, 32, 1429 (one page).
9. Cancelliere, A., Ancarani, A., and Rossi, G. (1998). "Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions." *J. of Hydrologic Engineering*, 3(2), 140-148.
10. Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, J.H. (2001). "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search, *Society for Modeling and Simulation International (SCS)*." *Simulation*, 76(2), 60-68.

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. Omran, G.H., and Mahdavi, M. (2008). "Global-best harmony search." *Applied Mathematics and Computation*, 198, 643-656.
13. Pan, Q.K., Suganthan, P.N., and Tasgetiren, M.F. (2009). "A harmony search with ensemble of parameter sets." *Evolutionary Computation, IEEE Conf.*, Trondheim, 1815-1820.
14. Fesanghary, M., Mahdavi, M., Minary-Jolandan M., and Alizadeh, Y. (2008). "Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems." *Comput. Methods in Appl. Mech. and Engrg*, 197(33-40), 3080-3091.
15. Pan, Q.K., Suganthan, P.N., Tasgetiren, M.F., and Liang, J.J. (2010). "A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems." *Applied Mathematics and Computation*, 216(3), 830-848.
16. Cancelliere, A., Ancarani, A., and Rossi, G. (1998). "Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions." *J. of Hydrologic Engineering*, 3(2), 140-148.
17. Lee, K.S., and Geem, Z. W. (2005). "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice." *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 194, 3902-3933.
18. Isfahani, B. (2011). "Integrated management methods of water resources : City of Terhan." M.Sc. Thesis, Khajeh Nasir University of Tech, Terhan. (In Persian)