

# الگوریتم مورچگان پیوسته در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی، مطالعه موردی: مخازن حوزه کرخه

علیرضا برهانی داریان<sup>۱</sup> امیر محمد مرادی<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۸/۲/۲۹ پذیرش ۸۹/۵/۷)

## چکیده

هدف از این تحقیق، مدل‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های پیچیده چندمخزنی به روش الگوریتم جامعه مورچگان  $ACO_R$  و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک GA به‌عنوان یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های مطرح در این زمینه بود. در این راستا، از الگوریتم‌های GA و  $ACO_R$  برای تعیین میزان بهره‌برداری بهینه درازمدت در یک سیستم سه مخزنی واقع در حوزه آبریز کرخه استفاده شد. سیستم مورد نظر در این تحقیق یک سیستم چندمخزنی خاص بود. به این مفهوم که علاوه بر بهینه نمودن میزان خروجی از هر مخزن، لازم بود تخصیص بهینه بین چهار منطقه کشاورزی به منظور تأمین نیاز آبیاری به‌طور همزمان انجام شده و نیازهای زیست‌محیطی نیز در هر بازه رعایت گردد. از الگوریتم مورچگان تعداد محدودی کاربرد در زمینه منابع آب یافت می‌شود، اما از کاربرد  $ACO_R$  موردی به چشم نمی‌خورد. لذا برعکس روش GA کارایی روش‌های مبتنی بر جامعه مورچگان در حل مسائل منابع آب در حد مناسب ارزیابی نشده است. در این تحقیق  $ACO_R$  به‌عنوان جدیدترین روش از الگوریتم‌های جامعه مورچگان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. سپس، عملکرد این الگوریتم با GA مقایسه شد. نتایج این بررسی نشان داد که الگوریتم  $ACO_R$  با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم، علاوه بر افزایش زمان محاسبات، با کاهش میزان بهینگی مواجه خواهد شد و بدون ایجاد تمهیداتی،  $ACO_R$  از حل مسائل پیچیده منابع آب ناتوان خواهد بود. برای غلبه بر بخشی از این مشکل، تکنیک‌های خاصی معرفی شد و در الگوریتم  $ACO_R$  استفاده گردید. این تکنیک‌ها قادراند زمان محاسبات را به‌صورت قابل توجهی کاهش داده و نتایج را به‌طور محسوسی بهبود بخشند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم مورچگان پیوسته، الگوریتم ژنتیک، چندمخزنی، بهینه‌سازی، بهره‌برداری

## Application of Ant-Colony-Based Algorithms to Multi-Reservoir Water Resources Problems

Alireza Borhani Darian<sup>1</sup>

Amir Mohammad Moradi<sup>2</sup>

(Received May 19, 2009 Accepted July, 29, 2010)

### Abstract

In this paper, the continuous Ant Colony Optimization Algorithm ( $ACO_R$ ) is used to investigate the optimum operation of complex multi-reservoir systems. The results are compared with those of the well-known Genetic Algorithm (GA). For this purpose, GA and  $ACO_R$  are used to solve the long-term operation of a three-reservoir system in Karkheh Basin, southwestern Iran. The solution must determine monthly releases from the three reservoirs and their optimum allocations among the four agricultural demand areas. Meanwhile, a minimum discharge must be maintained within the river reaches for environmental concerns. Review of past research shows that only a few applications of Ant Colony have been generally made in water resources system problems; however, up to the time of initiating this paper, we found no other application of the  $ACO_R$  in this area. Therefore, unlike GA, application of Ant-Colony-based algorithms in water resources systems has not been thoroughly evaluated and deserves serious study. In this paper, the  $ACO_R$  is studied as the most recent Ant-Colony-based algorithm and its application in a multi-reservoir system is evaluated. The results indicate that with when the number of decision variables increases, a longer computational time is required and the optimum solutions found are inferior. Therefore, the  $ACO_R$  would be unable to solve complex water resources problems unless some modifications are considered. To overcome a part of these drawbacks, a number of techniques are introduced in this paper that considerably improve the quality of the method by decreasing the required computation time and by enhancing optimum solutions found.

**Keywords:** Ant Colony Algorithms, Genetic Algorithms, Multi Reservoir, Optimization, Application, Operation.

1. Assoc. Prof. of Water Resources, Dept. of Civil Eng., Khajeh Nasir Toosi University of Tech., Tehran, (Corresponding Author) (+98 21) 88779473 dariania@yahoo.com

2. M.Sc. Student, Dept. of Civil Eng., Khajeh Nasir Toosi University of Tech., Tehran

۱- دانشیار منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (نویسنده مسئول) ۸۸۷۹۴۷۳ (۰۲۱) dariania@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

به‌عنوان اصلی‌ترین کانون توجه محققان، موضوع بسیاری از مسائل منابع آب اعم از سیستم‌های ساده و پیچیده را به‌خود اختصاص داده است. روش الگوریتم ژنتیک دارای این مزیت ویژه است که می‌تواند به‌طور مستقیم با مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیک و کیفیت آب مرتبط شود بدون اینکه به فرضیات ساده‌سازی کننده در مدل یا در محاسبه مشتقات نیاز داشته باشد. از این روش GA در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن به‌ویژه در سیستم‌های بزرگ واقعی با توابع هدف و قیدهای پیچیده غیرخطی و تفکیک ناپذیر، استراتژی مناسبی به‌نظر می‌رسد. [۲].

الگوریتم‌های ژنتیک از طریق فرایندی شبیه به «روشهای انتخاب و ژنتیک طبیعی» در علوم زیست‌شناسی به بهینه‌سازی مسائل می‌پردازند [۳، ۴ و ۵].

در این راستا و به‌عنوان اولین کاربردها، ایسات<sup>۴</sup> و هال<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۴ استفاده از GA را در یک سیستم چهار مخزنی معروف بررسی کردند. آنها مدل GA را با برنامه‌ریزی پویا مقایسه نموده و آنرا به لحاظ نیازهای محاسباتی کاملاً برتر گزارش کردند [۶]. در تحقیقی دیگر، اولیویرا<sup>۶</sup> و لاکس<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۷ از GA برای بهینه‌سازی منحنی‌های فرمان در سیستم‌های چند مخزنی استفاده کردند و آنرا راهی عملی و توانمند برای تخمین سیاست‌های بهره‌برداری در سیستم‌های مخازن پیچیده ارزیابی نمودند [۷].

واردلا<sup>۸</sup> و شریف در سال ۱۹۹۹ و سپس شریف و واردلا در سال ۲۰۰۰ از GA برای بهینه‌سازی سیستم چهار مخزنی معروف مورد اشاره در بالا استفاده کرده و ضمن توسعه آن نشان دادند که این روش می‌تواند جوابهای توانمند و قابل قبولی ارائه دهد [۸ و ۹]. آنها GA را با موفقیت در بهینه‌سازی سیستم‌های چند مخزنی استفاده کردند. کای و همکاران<sup>۹</sup> در سال ۲۰۰۱، GA را با برنامه‌ریزی خطی ترکیب نموده و برای حل مسائل مدیریت منابع آب بزرگ غیرخطی با موفقیت مورد استفاده قرار دادند [۱۰].

چن<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۰۳ از این الگوریتم، در به‌دست آوردن منحنی‌های فرمان یک سیستم تک مخزنی استفاده کرده و آنرا برای بهینه‌سازی سیستم‌های کاملاً غیرخطی بسیار مؤثر ارزیابی نمود [۱۱]. تونگ و همکاران<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۳ از GA برای بهینه‌سازی منحنی‌های مرزی از پیش تعریف شده با موفقیت استفاده کرده و آنرا ابزاری قدرتمند برای یافتن استراتژی‌های بهینه مدیریت منابع آب ارزیابی نمودند [۱۲].

تعیین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن یکی از بحثهای مهم در زمینه منابع آب به‌شمار می‌آید. به‌طوری‌که از اواخر دهه ۵۰ و به‌خصوص اوایل دهه ۶۰ موضوع تعداد زیادی از تحقیقات منابع آب در این ارتباط است. سیستم‌های طبیعی حوزه‌های آبریز و مخازن، علی‌رغم ظاهر ساده از پیچیدگی بسیاری برخوردارند. به‌نحوی‌که می‌توان آنها را در زمره پیچیده‌ترین سیستم‌های مطرح در مهندسی قلمداد نمود. این پیچیدگی به‌طور عمده حاصل تصادفی و غیرقطعی بودن متغیرهای دخیل در این سیستم‌ها است اما این وجه تنها بخشی از پیچیدگی را توجیه می‌کند. زیرا بخش عمده‌ای از پیچیدگی مربوط به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم در طول مکان و زمان است. این ویژگی‌ها باعث عدم کارایی الگوریتم‌های مطرح و قوی در عرصه ریاضیات کاربردی در حل مسائل پیش پا افتاده سیستم‌های منابع آب شده است. لذا از شروع تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب، ضرورت پرداختن به موضوع انتخاب روش، تهیه و فرمول‌بندی مناسب مدل همیشه مطرح بوده است. در موارد زیادی متخصصان منابع آب، به ابداع و معرفی روشهای مختلف سازگار با مسائل سیستم‌های منابع آب دست زده‌اند. توسعه و شکوفایی علم مدیریت منابع آب خود مرهون این تلاشها است.

سیمونویچ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۰ با اشاره به پارادایم پیچیدگی<sup>۲</sup>، آینده مسائل منابع آب را حتی پیچیده‌تر از حال پیش‌بینی نموده و پیشنهاد کرده است برای روبرو شدن با این وضعیت جدید باید ابزاری نو در نظر گرفته شود [۱]. وی پیچیدگی را در بخش قلمرو مسائل منابع آب و در زمینه‌هایی از قبیل استرس قرار گرفتن سیستم‌های منابع آب به‌دنبال افزایش جمعیت و افزایش تقاضا برای منابع محدود آب و لزوم استفاده از بخشهای مرتبط جامعه (ذینفعان) در مدیریت بهینه منابع آب و از طرف دیگر اعمال تغییرات لازم در ساختارها و آموزش، عنوان نموده است. به عقیده وی، بهینه‌سازی ریاضیاتی به‌عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند در این تغییر اساسی، جایگاه ویژه‌ای خواهد داشت. روشهای معمول و کلاسیک گذشته نه‌قدراند به‌خوبی از پتانسیل‌های موجود در سخت‌افزارهای جدید بهره‌برند و نه برای حل مسائل پیچیده پیش رو مناسب‌اند. تلاشهای مستمر در این زمینه راه را برای بهبود و دستیابی به روشهای مناسب‌تر، هموار خواهد کرد. از شروع دهه ۹۰ میلادی با ورود الگوریتم‌های فراکاوشی، افق روشنی برای حل مسائل پیچیده و بزرگ در منابع آب گشوده شد. الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup>

4 Esat  
5 Hall  
6 Oliveira  
7 Loucks  
8 Wardlaw  
9 Cai et al.  
10 Chen  
11 Tung et al.

1 Simonovic  
2 Complexity Paradigm  
3 Genetic Algorithm (GA)

ممتحن و برهانی داریان در سال ۱۳۸۴ از GA در بهینه‌سازی ساختارهای مختلفی از سیاست‌های بهره‌برداری برای یک سیستم تک مخزنی استفاده کرده و عملکرد آنرا با روشهای SDP<sup>۱</sup> و DPR<sup>۲</sup> به عنوان دو روش مرسوم بهینه‌سازی مقایسه نمودند [۱۳ و ۱۴]. سپس، برهانی داریان و ممتحن در سال ۲۰۰۹ استفاده از الگوریتم اصلاح شده GA در یک سیستم بزرگ ۱۶ مخزنی در کارون بزرگ را برای پیدا کردن سیاست‌های بهره‌برداری بهینه به نمایش گذاشتند [۱۵].

کاربردهای الگوریتم مورچگان در زمینه منابع آب بسیار محدود است. شاید اولین مورد در این زمینه مربوط به کار عباس‌پور و همکاران برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاکهای اشباع با استفاده از الگوریتم ACO باشد [۱۶]. همچنین، کومار<sup>۳</sup> و ردی<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۶ از بهینه‌سازی جامعه مورچگان برای بهره‌برداری مخزن چند منظوره استفاده نموده و نتایج آن را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند [۱۷]. آنها بدون ذکر جزئیات بیشتر عنوان کردند که در دوره‌های بلند مدت، ACO بهتر از GA رفتار می‌کند.

جلالی و همکاران در سال ۲۰۰۷ از الگوریتم‌های مورچگان با ساختار گسسته در یک سیستم چند مخزنی استفاده کردند [۱۸]. زکچین و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۷ از الگوریتم‌های ACO در طراحی سیستم توزیع آب استفاده نموده و عملکرد آنها را مقایسه کردند [۱۹].

برهانی داریان و مرتضوی در سال ۱۳۸۷ از الگوریتم ACO با ساختار حجم ذخیره گسسته در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنی دز استفاده نموده و تصریح کردند که حل مسائل پیوسته با ساختار گسسته متغیرهای تصمیم با استفاده از الگوریتم ACO به نتایج نه‌چندان خوب در مقایسه با روشهای GA و حتی DP منجر می‌شود [۲۰]. از دیگر مشکلات ذکر شده در آن مقاله، موضوع زمانبر بودن الگوریتم مورچگان در مقایسه با سایر روشها بود. این مشکل غالباً در مقالات دوریگو<sup>۶</sup> به‌عنوان مبتکر این روش، مورد غفلت قرار گرفته و به‌نجوی از توجه به‌دور گذاشته شده است. در واقع یکی از مشکلات جدی ACO این است که در مسایل بزرگ با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم، مدت زمان به طرز چشمگیری افزایش می‌یابد. بدیهی است مدت زمان محاسبات به‌عنوان یکی از نکات کلیدی در مدل‌سازی سیستم‌ها و حل مسائل کاربردی مطرح بوده و ارزیابی مدل بدون توجه به این موضوع، ناقص خواهد بود.

<sup>1</sup> Stochastic Dynamic Programming  
<sup>2</sup> Dynamic Programming and Regression  
<sup>3</sup> Kumar  
<sup>4</sup> Reddy  
<sup>5</sup> Zecchin et al.  
<sup>6</sup> Dorigo

سوشا<sup>۷</sup> و دوریگو در سال ۲۰۰۸ نسخه جدیدی از الگوریتم جامعه مورچگان را پیشنهاد نمودند که قادر بود برخلاف نسخه‌های پیشین در محیط پیوسته به بهینه‌سازی پردازد [۲۱]. سوشا و دوریگو مزایای زیادی برای روش پیشنهادی خود تحت عنوان الگوریتم جامعه مورچگان پیوسته مطرح نموده‌اند و از آن به‌عنوان روشی که بتواند ضمن بهره‌گیری از مزایای ACO به حل مسائل سیستم‌هایی با متغیرهای پیوسته پردازد یاد کرده‌اند. برهانی داریان و مرادی در سال ۲۰۰۸ از الگوریتم مذکور برای تعیین مسیر بهره‌برداری بهینه از یک سیستم تک مخزنی استفاده کرده و سپس آن را با یک الگوریتم ژنتیک قوی مقایسه نمودند [۲۲]. آنها در این تحقیق نشان دادند که الگوریتم پیوسته همچون الگوریتم‌های گسسته مورچگان با افزایش افق زمان، به نتایج ضعیف منجر می‌شود. سپس مرادی و برهانی داریان در سال ۲۰۰۹ در تحقیقی دیگر الگوریتم مذکور را با الگوریتم هجوم ذرات مورد مقایسه قرار دادند [۲۳].

در این مقاله کاربرد الگوریتم جامعه مورچگان پیوسته (ACO<sub>R</sub>)، به‌عنوان یکی از روشهای فراکاوشی جدید، در حل مسائل سیستم‌های چند مخزنی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته و سپس کارایی آن با روش شناخته شده الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه شد. برای این منظور، از یک سیستم سه مخزنی شامل مخازن سازبن علیا، تنگ معشوره و کرخه در حوزه آبریز کرخه استفاده شد. در این مسئله علاوه بر بهینه نمودن رهاسازی از هر مخزن، همزمان عمل تخصیص بین مناطق کشاورزی و تأمین حداقل نیاز زیست محیطی در بازه‌های مختلف رودخانه نیز انجام می‌شود. بدیهی است ترکیب این موارد در کنار هم باعث پیچیدگی هر چه بیشتر سیستم شده و حل آن به‌عنوان یک چالش جدی در پیش روی الگوریتم‌ها قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که حل چنین سیستمی از توان بسیاری از الگوریتم‌ها فراتر بوده و می‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب در جهت ارزیابی آنها مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- الگوریتم جامعه مورچگان پیوسته (ACO<sub>R</sub>)

الگوریتم ACO از یک ساختار گسسته برای تعیین جواب استفاده می‌کند. مفهوم ساختار گسسته در ACO به این صورت است که هر کدام از متغیرهای تصمیم در بازه تعریف شده به تعداد مشخصی حالت تقسیم می‌شود. به‌عنوان مثال، در شکل ۱ متغیر تصمیم  $\lambda$  به ۱۰ قسمت تقسیم شده است که احتمال انتخاب هر کدام از این مقادیر گسسته در الگوریتم ACO بر اساس میزان فرومون و اطلاعات کاوشی خواهد بود. از طرفی، با گسسته‌سازی فضای

<sup>7</sup> Socha

	$s^1$	$s^2$	...	$s^i$	...	$s^n$	$f(s_i)$	$w_i$
$S_1$	$s_1^1$	$s_1^2$	...	$s_1^i$	...	$s_1^n$	$f(s_1)$	$w_1$
$S_2$	$s_2^1$	$s_2^2$	...	$s_2^i$	...	$s_2^n$	$f(s_2)$	$w_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_i$	$s_i^1$	$s_i^2$	...	$s_i^i$	...	$s_i^n$	$f(s_i)$	$w_i$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_k$	$s_k^1$	$s_k^2$	...	$s_k^i$	...	$s_k^n$	$f(s_k)$	$w_k$
	$G^1$	$G^2$	...	$G^i$	...	$G^n$		

شکل ۳- نمایش آرشیو مجموعه جوابها [۲۱]

به عنوان مثال برای متغیر تصمیم  $i$  ام، یک تابع گوسی کرنل  $G^i(x)$  مطابق رابطه زیر تعریف می شود

$$G^i(x) = \sum_{l=1}^k \omega_l g_l^i(x) = \sum_{l=1}^k \omega_l \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_l)^2}{2\sigma_l^2}} \quad (1)$$

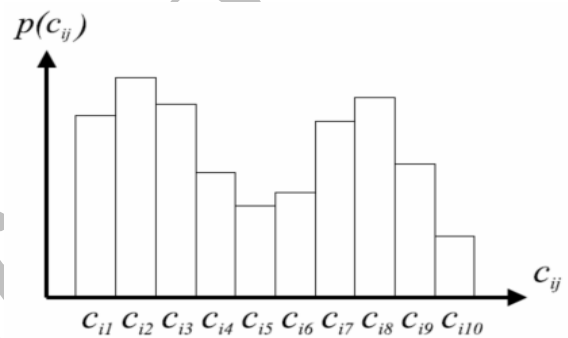
به منظور تعریف این رابطه باید سه پارامتر  $\omega$  و  $\mu^i$  و  $\sigma^i$  مشخص شوند. در ادامه به این موضوع و نحوه استفاده از رابطه در الگوریتم  $ACO_R$  پرداخته شد.

در الگوریتم  $ACO_R$ ، از یک آرشیو مطابق با شکل ۳ برای ذخیره مجموعه جوابها استفاده می شود. به همین منظور، در سیستمی با  $n$  متغیر تصمیم، تعداد  $k$  تابع گوسی منفرد برای هر متغیر تصمیم در آرشیو در نظر گرفته می شود که با انتخاب هر یک از آنها و تولید جواب جدید، در واقع وضعیتی معادل با یک تابع گوسی کرنل برای هر متغیر به وجود می آید.

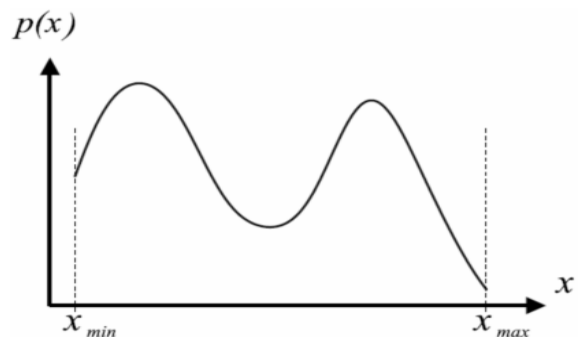
در شکل ۳، تعداد جوابهای ذخیره شده در آرشیو برابر  $k$  است و  $l$  امین جواب ذخیره شده در آرشیو، با  $S_l$  مشخص شده است. متغیرهای تصمیم مربوط به  $l$  امین جواب، با  $s_l^1$  و  $s_l^2$  و به همین ترتیب تا متغیر تصمیم  $n$  ام با  $s_l^n$  نشان داده شده است. این متغیرها وارد تابع هدف شده و سپس مقدار آن برای هر جواب،  $f(s_l)$ ، محاسبه می شود. آنگاه، جوابهای موجود در آرشیو بر اساس کیفیت آنها به صورت نزولی مرتب شده و ذخیره می گردند. سپس، برای هر جواب  $S_l$ ، یک وزن،  $\omega$ ، تعیین می شود که مقدار آن مرتبط با کیفیت جواب مربوطه است. بنابراین، رابطه  $\omega_1 \geq \omega_2 \geq \dots \geq \omega_k$  برقرار بوده و مقدار این وزن ها می شود (رابطه ۲).

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (2)$$

متغیرها، محدودیتی برای الگوریتم به وجود می آید که این خود باعث کاهش دقت بهینگی خواهد شد و در صورتی که با تقسیم بندی فضای بین متغیرهای تصمیم به تعداد زیاد، سعی در بالا بردن دقت جوابها شود، زمان برنامه متناسب با آن افزایش خواهد یافت. در این صورت ممکن است پیچیده تر شدن مسئله با تقسیم بندی زیاد باعث کاهش دقت نیز بشود. در این راستا و برای جبران این مشکل، تعمیم  $ACO$  به فضای پیوسته مد نظر قرار گرفت. در صورتی که فضای متغیر تصمیم مطابق شکل ۲ پیوسته فرض شود، الگوریتم قادر خواهد بود روی فضای  $R$  از اعداد حقیقی حرکت نماید. در الگوریتم  $ACO_R$  پیوسته سازی فضا در متغیرهای تصمیم با استفاده از یک تابع چگالی احتمال<sup>۱</sup> (PDF) انجام می پذیرد [۲۱].



شکل ۱- ساختار گسسته در  $ACO$  [۲۱]



شکل ۲- تابع چگالی احتمال در  $ACO_R$  [۲۱]

سوشا و دوریگو در سال ۲۰۰۸ استفاده از یک تابع گوسی برای ایجاد چنین ساختاری را پیشنهاد نموده اند [۲۱]. یک تابع گوسی تک بعدی<sup>۲</sup> یا منفرد، قادر به تولید چند نقطه ماکسیم نیست، حال آنکه استفاده از یک تابع گوسی کرنل<sup>۳</sup>، که حاصل مجموع وزنی چندین توابع گوسی منفرد است، می تواند چنین وظیفه ای را انجام دهد (شکل ۲).

<sup>1</sup> Probability Density Function (PDF)

<sup>2</sup> One-Dimensional Gaussian Function

<sup>3</sup> Gaussian Kernel Function

که در این رابطه :

Q پارامتری است که مقدار آن باید تنظیم شود. چنانچه مقدار Q خیلی کوچک باشد، شانس انتخاب حلهای قرار گرفته در انتهای آرشیو (حلهای ضعیف) از بین می‌رود و بهترین حلهای یعنی حلهایی که در ردیفهای بالای آرشیو قرار دارند، شانس بیشتری خواهند داشت. ولی کاهش بیش از حد آن می‌تواند باعث گیر افتادن حل در بهینه محلی شود.

پارامتر دوم  $\mu_i^l$  در رابطه ۱، برای جواب  $l$  و متغیر تصمیم  $i$  ام در آرشیو جوابها، برابر با  $s_i^l$  در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که تعیین پارامتر سوم  $\sigma_i^l$ ، از پیچیدگی بیشتری نسبت به دو پارامتر قبلی برخوردار است لذا برای روشن شدن مطلب، فرض می‌شود که یک مورچه با استفاده از یک روش احتمالاتی نظیر چرخ گردان<sup>۱</sup>، یکی از این جوابها مانند  $S_i$  را انتخاب نماید. با انتخاب این جواب، در مرحله بعد یک جواب جدید به صورتی که در ادامه تشریح خواهد شد با استفاده از تابع گوسی تولید می‌شود. در تابع گوسی باید میانگین و انحراف معیار مشخص شود.

برای تعیین  $\sigma_i^l$ ، انحراف معیار بین تمامی  $k$  مقدار متغیر  $i$  ام نسبت به متغیر تصمیم  $S_i^l$  مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود

$$\sigma_i^l = \xi \sum_{e=1}^k \frac{|s_e^i - s_i^l|}{k-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

که در این رابطه

ضریب  $\xi > 0$  یک پارامتر قابل تنظیم است و شبیه به نرخ تبخیر فرمون در ACO رفتار می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر باشد، سرعت همگرایی الگوریتم پایین‌تر می‌آید. نرخ تبخیر فرمون در الگوریتم ACO، حافظه بلند مدت را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث فراموش شدن بدترین حلهای می‌شود.  $\xi$  در  $ACO_R$  نیز حافظه بلند مدت الگوریتم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث می‌شود که حلهای بدتر، احتمال انتخاب کمتری داشته باشند و در نتیجه باعث پاک شدن آنها می‌شود [۲۱].

حال برای تولید جواب جدید بر اساس جواب  $S_i$  یک عدد تصادفی نرمال به روش باکس مولر با میانگین  $S_i^l$  و انحراف معیار  $\sigma_i^l$  برای متغیر تصمیم  $i$  ام تولید می‌شود [۲۴]. مقدار عدد تولید شده جدید بر اساس متغیر  $i$  ام خواهد بود. این کار برای همه  $n$  متغیر تکرار می‌شود تا یک جواب برای کلیه متغیرهای تصمیم تولید گردد. جواب تولید شده حاصل انتخاب یکی از مورچه‌هاست. با تکرار این مرحله برای هر مورچه، سرانجام به تعداد مورچه‌ها، جواب جدید تولید و به آرشیو اضافه می‌شود. در ادامه، پس از مرتب سازی کل جوابها،  $k$  جواب برتر ذخیره و مابقی پاک می‌شود.

لازم به توضیح است هر چه دامنه نمودار زنگوله‌ای شکل تابع گوسی کاهش یابد، یا به عبارتی دیگر میزان پراکندگی تمامی جوابها در آرشیو برای متغیر تصمیم  $i$  ام کاهش یابد و در حد این کاهش به سمت صفر میل کند، در آن موقع هر مقدار جدیدی که برای متغیر تصمیم  $i$  ام تولید شود مشابه دیگر مقادیر متغیر تصمیم  $i$  ام در آرشیو خواهد بود و حل نسبت به آن متغیر تصمیم به ایستایی خواهد رسید.

همچنین، با انتخاب هریک از توابع گوسی (به عنوان مثال برای متغیر تصمیم  $i$  ام و جواب  $l$ ، تابع  $g_i^l(x)$  و تولید جواب جدید به صورت عدد تصادفی با توزیع نرمال، به شرحی که در بالا آمد، تابع گوسی کرنل به وجود می‌آید. بنابراین از تابع گوسی کرنل به طور مستقیم استفاده نمی‌شود بلکه روش مورد استفاده برای تولید هر متغیر تصمیم جدید در بطن خود تابع گوسی کرنل را برای مجموعه جوابها در بردارد. همان‌طور که می‌دانیم تابع گوسی منفرد فقط قادر به تولید یک نقطه ماکسیمم خواهد بود. بنابراین، با داشتن چندین تابع گوسی و وزن دادن به هر کدام، تولید جواب جدید با استفاده از هر مورچه در وضعیتی معادل با تابع کرنل شکل می‌گیرد.

بهنگام سازی میزان فرمون در الگوریتم  $ACO_R$  با ذخیره جوابهای برتر و حذف جوابهای ضعیف در آرشیو جواب انجام می‌شود که این روش بهنگام سازی توسط گانش<sup>۲</sup> و میدندروف<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۲ الگوریتم PB-ACO پیشنهاد شد [۲۵].

خاتمه الگوریتم به سه طریق می‌تواند انجام شود:

۱- عدم پیشرفت: یعنی تمامی جوابهای موجود در آرشیو مشابه هم شوند به صورتی که جواب جدید تولید شده با جوابهای قبلی متفاوت نباشد. گاهی ممکن است الگوریتم در یک بهینه موضعی، گیر کند و با تعداد تکرارهای متوالی و گذر زمان، بتواند از این حالت خارج شود که بر اساس نوع مسئله و تجربه روی این الگوریتم‌ها، می‌توان به عدم پیشرفت آنها پی برد. به همین دلیل می‌توان شرط نمود در صورتی که با  $t$  بار تکرار، پیشرفت الگوریتم کمتر از  $\epsilon$  شود، در آن صورت الگوریتم قادر به پیشرفت نبوده و خاتمه آن اعلام شود.

۲- تعداد تکرارها: شرط توقف را می‌توان با تعداد تکرار مشخصی انجام داد. تعداد تکرارها را می‌توان به صورت تجربی و در شرایط مسئله مشخص نمود.

۳- رسیدن به مقدار مشخص: می‌توان الگوریتم را تا همگرا شدن به مقدار مشخصی ادامه داد.

### ۳- مطالعه موردی: مخازن حوزه کرخه

حوزه آبریز کرخه به لحاظ تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، جزئی از حوزه آبریز خلیج فارس به شمار می‌آید. این حوزه از شمال به

<sup>2</sup> Guntsch  
<sup>3</sup> Middendorf

<sup>1</sup> Roulette wheel

سدهای سازین در ۳۰ کیلومتری شرق استان ایلام بر روی رودخانه سیمره و تنگ معشوره در ۹۰ کیلومتری خرم‌آباد بر روی رودخانه کشکان در استان چهارمحال و بختیاری قرار گرفته‌اند. مخازن سازین و معشوره هنوز در فاز مطالعاتی بوده و در مرحله ساخت قرار نگرفته‌اند [۲۶].

شکل ۴ سیستم سه مخزنی مورد نظر در این تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که اشاره شد در این سیستم، بهره‌برداری بهینه از مخازن سازین، معشوره و کرخه برای تأمین نیازهای چهار منطقه کشاورزی، مورد نظر است. همچنین در پایین دست هر مخزن و نقطه انشعاب به منطقه شماره ۳ کشاورزی، تأمین نیازهای حداقل جریان زیست محیطی در رودخانه الزامی است. اولویت در تأمین نیازها به ترتیب برای جریان زیست محیطی داخل رودخانه و سپس کشاورزی مناطق است. برای ساده تر شدن مسئله از نیازهای ذخیره و تأمین برقایی صرف نظر شد، اما در صورت نیاز به راحتی می‌توان این بخشها را به مدل اضافه نمود.

جدول ۱ اطلاعات میانگین جریان‌های ورودی به سیستم را نشان می‌دهد. نیاز کشاورزی در مناطق چهارگانه و توزیع ماهانه تیخیر خالص از سطح مخازن به ترتیب در جدولهای ۲ و ۳ ارائه شده است. نیازهای زیست محیطی به صورت حداقل جریان در چهار بازه از رودخانه شامل پایین دست مخزن سازین، پایین دست مخزن تنگ معشوره، بالادست و پایین دست مخزن کرخه در هر ماه به طور ثابت به ترتیب برابر با ۷۳، ۱/۴۳، ۷۵ و ۷۵ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است.

حوزه رودخانه دز و از جنوب به قسمتی از مرز غربی ایران محدود می‌گردد. طول مرز مشترک حوزه رودخانه کرخه با حوزه رودخانه سیروان ۲۱۰ کیلومتر، با حوزه رودخانه قزل اوزن ۳۸ کیلومتر، با حوزه رودخانه قره‌چای ۱۹۵ کیلومتر، با حوزه رودخانه دز ۴۵۰ کیلومتر و با حوزه رودخانه‌های مرزی ایران و عراق ۵۱۵ کیلومتر است. وسعت حوزه آبریز رودخانه کرخه در داخل خاک ایران حدود ۵۱۵۲۷ کیلومتر مربع است که حدود ۳۳۶۷۴ کیلومتر مربع آن در مناطق کوهستانی قرار داشته و ۱۷۸۵۳ کیلومتر مربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهد. شاخه‌های اصلی رودخانه کرخه عبارت‌اند از رودخانه گاماسیاب، قره سو، کشکان، سیمره و رودخانه کرخه در حد فاصل محل تلاقی دو رودخانه کشکان و سیمره تا محل تخلیه آن به مرداب هور العظیم.

در این تحقیق از سه مخزن کرخه، سازین و تنگ معشوره و چهار منطقه کشاورزی واقع در این حوزه برای بررسی عملکرد مدل‌ها استفاده شد (شکل ۴). سد مخزنی کرخه در ۲۱ کیلومتری شمال غربی شهر اندیمشک بر روی رودخانه کرخه در استان خوزستان واقع شده است. ارتفاع این سد ۱۲۷ متر و طول تاج آن ۳۰۳۰ متر است. نوع سد از نوع خاکی با هسته رسی است که حجم کل آن، ۷۳۰۰ میلیون مترمکعب است و آبیگری آن از بهمن ماه ۱۳۷۸ آغاز گردیده است. اهداف احداث این مخزن، کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی آب رودخانه کرخه به منظور تأمین آب اراضی دشت‌های پای پل شامل اوان، دوسالک، ارایض و باغه و همچنین دشتهای حمیدیه، قدس، دشت آزادگان، دشت عباس، فکه و عین خوش و تولید انرژی برقایی و همچنین کنترل سیلابهای فصلی و جلوگیری از خسارات وارد به پایین دست بوده است.

جدول ۱- اطلاعات ماهانه میانگین جریان‌های ورودی تاریخی به سیستم سه مخزنی کرخه (میلیون مترمکعب)

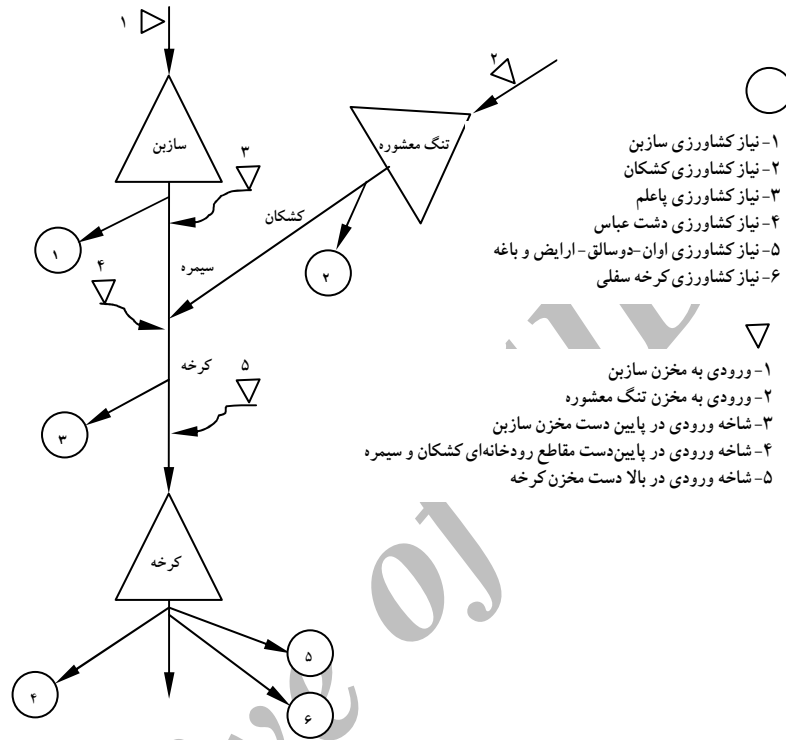
مخزن	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
سازین	۵۷	۱۳۹	۲۲۱	۲۳۳	۳۲۲	۵۲۹	۷۶۸	۵۰۷	۱۶۲	۶۹	۴۹	۴۲	۳۰۹۸
تنگ معشوره	۱۴	۲۱	۶۸	۸۸	۷۲	۶۷	۹۳	۶۶	۲۳	۱۳	۱۳	۱۳	۵۵۱
شاخه ورودی ۳	۲۵	۲۵	۳۴	۴۴	۳۱	۲۵	۲۴	۳۱	۳۹	۲۳	۱۹	۲۰	۳۴۰
شاخه ورودی ۴	۳۴	۵۲	۸۴	۵۷	۱۴۱	۲۱۶	۳۲۹	۲۳۳	۸۵	۵۵	۴۰	۳۱	۱۳۵۷
شاخه ورودی ۵	۱۸	۳۹	۸۴	۸۴	۸۰	۱۱۲	۸۹	۱۳۰	۱۵۱	۶۲	۳۷	۲۹	۹۱۵

جدول ۲- نیاز کشاورزی ماهانه در مناطق ۴ گانه سیستم سه مخزنی (میلیون مترمکعب)

منطقه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
۱	۴۸/۵	۴۸/۵	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۶۰/۶	۴۰۰
۲	۲۰/۴	۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۸	۵۵/۸	۶۹/۱	۷۰	۵۱/۸	۳۱/۷	۳۰۱
۳	۳۷/۲	۳۷/۲	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۳۰۷
جمع مناطق ۶ و ۵.۴	۳۲۶/۷	۲۱۹/۹	۱۴۸/۷	۱۵۷/۹	۱۵۶/۲	۲۷۶/۰	۴۱۳/۸	۴۱۱/۶	۳۳۱/۹	۴۰۶/۵	۴۰۳/۷	۴۴۵/۸	۳۶۹۹

جدول ۳- توزیع ماهانه تبخیر خالص از سطح مخازن کرخه (متر)

مخزن	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
سازین	۰/۱۶۷	۰/۰۷۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۵۶	۰/۱۱۴	۰/۲۱۳	۰/۲۴۹	۰/۲۴۳	۰/۲۲۰	۱/۳۴
تنگ معشوره	۰/۱۴۹	۰/۰۶۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸	۰/۰	۰/۰۱۷	۰/۰۶۷	۰/۱۲۱	۰/۱۸۱	۰/۲۱۶	۰/۲۲۰	۰/۱۹۱	۱/۲۵
کرخه	۰/۲۰۸	۰/۱۳۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۱	۰/۰۷۰	۰/۰۹۹	۰/۱۴۸	۰/۲۱۱	۰/۲۶۶	۰/۲۸۰	۰/۲۷۴	۰/۲۴۴	۲/۱



شکل ۴- سیستم سه مخزنی کرخه همراه با مناطق نیاز

قیود مسئله:

$$S_{t+1}^{NR} = S_t^{NR} + Q_t^{NR} - R_t^{NR} - E_t^{NR} \quad (5)$$

$$R_t^{NR} \geq R_{\min}^{NR} \quad (6)$$

$$S_{\min}^{NR} \leq S_t^{NR} \leq S_{\max}^{NR} \quad (7)$$

$$S_1^{NR} = S_{T+1}^{NR} \quad (8)$$

که در این روابط

$S, R, Q, E$  و  $D$  به ترتیب عبارت‌اند از حجم ذخیره اول دوره، میزان ورودی، میزان رهاسازی، حجم تبخیر از سطح مخازن و نیاز ماهانه مناطق کشاورزی و  $NR$  شماره مخزن است.  $Rg$  میزان تخصیص آب به منطقه زام کشاورزی است. ذخیره در شروع و پایان آخرین دوره برای همه مخازن، نامعلوم اما برابر فرض شد. این شرط در رابطه ۸ مشخص شده است. در حل این مسئله، ابتدا

با استفاده از این مدل، مسئله برای یک دوره ۴۷ ساله (۵۶۴ ماه) از سال آبی ۳۴-۱۳۳۳ تا ۸۰-۱۳۷۹ حل شده و مسیر بهینه بهره‌برداری شامل برداشت بهینه از هر مخزن و میزان بهینه تأمین هر یک از نیازها در طول این ماهها تعیین شد. صرف‌نظر از قیود مربوط به تأمین نیاز حداقل زیست محیطی در بازه‌ها، تعداد متغیرهای تصمیم این مسئله برابر با ۳۹۴۸ خواهد بود که حل آن را وسط هر الگوریتم شناخته شده‌ای با چالش جدی روبرو می‌کند. تابع هدف مسئله به صورت حداقل‌سازی تابع خسارت درجه دو برای موارد کمبود (تابع خسارت یک‌طرفه) در نظر گرفته شده و به‌همراه سایر قیود متعارف در ادامه آمده است.

تابع هدف:  
(۴)

$$\text{Min } Z = \begin{cases} \sum_{t=1}^{564} \sum_{j=1}^4 (D_t^j - Rg_t^j)^2 & \text{if } Rg_t^j < D_t^j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

مقادیر پارامترهای الگوریتم  $ACO_R$  مطابق جدول ۴ مشخص گردید [۲۲].

مدل کوتاه مدت، یک مدل یک‌ساله با ساختار مشابه است و تفاوت آن با مدل اصلی (بلند مدت) تنها در تعداد سالهای بهینه‌سازی است. با استفاده از آمار یک سال میانگین، مدل کوتاه مدت اجرا شده و نتایج آن به‌عنوان آرشیو اولیه در مدل بلند مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب سال مورد نظر برای مناسب بودن نتایج حاصله در آرشیو اولیه مدل بلند مدت مهم است زیرا انتخاب سال پرآبی یا کم آبی منجر به نتایج غیرمتعارف شده و کارایی لازم را برای تشکیل آرشیو اولیه از دست خواهد داد. استفاده از یک سال با آبدی میانگین منجر به نتایجی می‌شود که نشان‌دهنده وضعیت کلی سیستم است. در این مقاله از آمار سال آبی ۳۴-۱۳۳۳ به‌عنوان دوره‌ای با آبدی میانگین در مدل کوتاه مدت استفاده شد. برای تکمیل آرشیو اولیه مدل بلند مدت نتایج بهینه مدل کوتاه مدت برای همه سالها به‌صورت ثابت تکرار می‌شود، و به این ترتیب در مقایسه با آرشیو اولیه تصادفی، یک آرشیو اولیه نسبتاً نزدیک‌تری به جواب بهینه تشکیل می‌شود که نقطه شروع بسیار مناسبی برای جستجوی حل بهینه محسوب می‌شود. نتایج بررسی نشان می‌دهد که به‌کارگیری این روش تأثیر محسوسی در سرعت و زمان همگرایی حل هر دو الگوریتم دارد.

اطلاعات جریان رودخانه برای مدل کوتاه مدت در جدول ۵ آمده است. نتایج به‌دست آمده از این مدل و الگوریتم ژنتیک برای دوره کوتاه مدت در جدول ۶ مقایسه شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در الگوریتم ژنتیک نیز مشابه  $ACO_R$  از یک مدل کوتاه مدت برای ساخت جمعیت اولیه مدل بلند مدت استفاده شده است. این روش هم در کاهش زمان و هم در نزدیک شدن حل شروع به نقطه بهینه بسیار مؤثر است. بهترین مقدار تابع هدف برای الگوریتم مورچه در دوره کوتاه مدت برابر  $10^6 \times 0.28$  میلیون مترمکعب و میانگین ۱۰ اجرای مستقل نیز تقریباً برابر  $10^6 \times 0.2863$  میلیون مترمکعب است. حل حاصل از اجرای مدل در لینگو<sup>۱</sup> برابر با  $10^6 \times 0.2753$  میلیون مترمکعب می‌باشد که نتایج بدست آمده با آن برابری می‌کند.

میزان حجم ذخیره شروع در اولین دوره برای همه مخازن به‌صورت تصادفی در فضای مجاز تعیین می‌شود. به‌طورکلی در برخورد با جوابهای غیرمجاز در کلیه روشها از روش اصلاحی جریمه استفاده شده است. متغیرهای تصمیم شامل حجم ذخیره در هر مخزن و میزان تخصیص به هر منطقه است و همان‌طور که اشاره شد تعداد آنها برابر ۳۹۴۸ متغیر مجهول خواهد بود. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و پیچیدگی‌های مسئله، هیچ‌یک از روشها قادر به یافتن حل بهینه مطلق نیستند.

برای حل چنین سیستم پیچیده‌ای که بهینه‌سازی را در طول زمان و مکان به‌صورت یکجا انجام می‌دهد، لازم است تا حد ممکن حل شروع مدل و آرشیو اولیه از حالت تصادفی خارج شود و الگوریتم در تعیین آن کمک شود. انجام این کار باعث کاهش زمان و کاهش انحراف در رسیدن به نقطه بهینه خواهد شد. برای دستیابی به چنین هدفی از یک مدل کوتاه مدت که در ادامه به جزئیات آن اشاره خواهد شد، بهره گرفته می‌شود. در این راستا، آرشیو اولیه (جمعیت اولیه) مدل بلند مدت، با توجه به نتایج مدل کوتاه مدت ساخته می‌شود. این روش برای هر دو مدل  $GA$  و  $ACO_R$  مورد استفاده قرار گرفته است.

برای حل مدل کوتاه مدت با استفاده از روش  $ACO_R$  ابتدا باید پارامترهای الگوریتم به‌دقت تنظیم شوند. دو پارامتر  $\xi$  و  $q$  میزان سرعت همگرایی و جستجوی همسایگی را کنترل می‌کنند. اگر مقدار این دو پارامتر، بسیار اندک باشد، افزایش سرعت همگرایی و کاهش فضای جستجوی محلی را در پی خواهد داشت. این کار، امکان گیر افتادن متغیرها در بهینه محلی را افزایش می‌دهد و عکس این مسئله نیز باعث کاهش بیش از حد سرعت همگرایی شده و در فرایند بهینگی مسیرهای گمراه‌کننده ایجاد می‌کند. به‌طوری که با افزایش پارامتر  $q$ ، میزان جستجوی محلی به سمت مناطق غیر بهینه توسعه می‌یابد که این خود در هموار نمودن مسیر بهینه، اثری نامطلوب بر جای می‌گذارد.

با توجه به تجربیات قبلی بر روی توابع ریاضی و نیز سیستم تک‌مخزنی دز محدوده تغییرات دو پارامتر  $\xi$  و  $q$  در این مسئله به ترتیب  $1/1$  تا  $1/4$  و  $0/1$  تا  $0/4$  در نظر گرفته شد و در نهایت

<sup>1</sup> Lingo

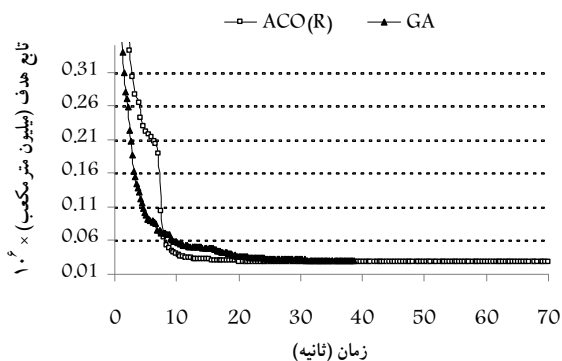
جدول ۴- پارامترهای الگوریتم  $ACO_R$

پارامتر	علامت	مقدار
تعداد مورچه‌ها	m	۳۰
سرعت همگرایی	$\xi$	۱/۲
پروسه محدودیت جستجویی (جستجوی محلی)	Q	۰/۲
اندازه آرشیو	K	۶۰



جدول ۵- جریان‌های ورودی تاریخی سال ۳۳-۳۴ به سیستم سه مخزنی کرخه (میلیون مترمکعب)

محل	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
مخزن سازین	۶۰	۱۲۸	۲۳۱	۶۹	۲۶۰	۴۰۵	۶۲۶	۵۲۵	۱۱۹	۵۸	۴۱	۳۹	۲۵۶۱
مخزن تنگ معشوره	۱۱	۱۸	۳۹	۷۰	۵۲	۳۸	۱۰۵	۱۲۷	۵۷	۲۳	۱۶	۱۳	۵۶۹



شکل ۵- پروسه همگرایی دو مدل GA و ACO<sub>R</sub> جهت مقایسه

برای بهبود آرشیو اولیه در الگوریتم ACO<sub>R</sub> از روش دیگری نیز استفاده شد. ایده اصلی این روش اصلاحی بر مبنای کار برهانی-داریان و ممتحن به‌دست آمد [۱۵]. در این روش، ابتدا مسئله اصلی به چند زیرمسئله کوچک تقسیم شده و سپس هر یک به‌طور جداگانه حل می‌شود. در خاتمه، از کنار هم قرار دادن نتایج آنها، آرشیو اولیه برای مدل بلند مدت تولید می‌گردد. فرق این آرشیو با آرشیو حاصل از روش اول، در متغیر بودن آن در طی سالهای مختلف است. به‌طوری که در جدول ۷ مشخص است روش دوم برتری محسوسی نسبت به روش اول نشان می‌دهد. زمان ساخت آرشیو اولیه در روش دوم ۳۰۰ ثانیه است.

پس از ساخت آرشیو اولیه در هر دو الگوریتم، مدل‌های بلند مدت تا رسیدن به زمان ۲۰۰۰ ثانیه اجرا شدند. نتایج حاصل از ۵ اجرای مستقل در جدول ۷ نشان داده شده است. روش دوم در تشکیل آرشیو اولیه الگوریتم ACO<sub>R</sub> برتری محسوسی نسبت به روش اول نشان داد. همچنین، میانگین تابع هدف روش دوم ACO<sub>R</sub> نسبت به میانگین حاصله برای GA تنها ۱۱ درصد ضعیف‌تر بود و نتیجه حاصله با این روش جدید، کاملاً قابل توجه بود.

جدول ۷- مقدار تابع هدف حاصل از پنج اجرای مستقل برای حل مسئله دراز مدت سیستم

ACO <sub>R</sub>		GA	معیار ارزیابی
روش دوم	روش اول		
$4/7 \times 10^6$	$6/6 \times 10^6$	$4/4 \times 10^6$	بهترین مقدار
$0/29 \times 10^6$	$0/24 \times 10^6$	$0/05 \times 10^6$	انحراف معیار
$5/0 \times 10^6$	$6/8 \times 10^6$	$4/5 \times 10^6$	میانگین

الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت کدبندی حقیقی نوشته شد و عملگرهای نهایی انتخاب شده آن عبارت بودند از روش انتخاب برشی، روش ترکیب میانه توسعه یافته و عملگر جهش موجود در الگوریتم‌های تکاملی [۲۷]. همچنین، با بررسی‌های مختلف، تعداد جمعیت هر نسل، ۵۰ کروموزوم؛ آستانه برشی در مرحله انتخاب کروموزوم‌ها، ۳۰ درصد؛ نرخ ترکیب، ۰/۸۵ و نرخ جهش، ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مدل کوتاه مدت با روش GA در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین مقدار تابع هدف برابر  $0/296 \times 10^6$  میلیون مترمکعب و میانگین ۱۰ اجرای مستقل از مدل برابر  $0/306 \times 10^6$  میلیون مترمکعب است.

مقایسه این نتایج نشان از برتری الگوریتم مورچگان پیوسته نسبت به GA در حل این مسئله کوتاه مدت دارد. به‌طوری که مشاهده می‌شود، میانگین مقدار تابع هدف در مدل ACO<sub>R</sub> در مقایسه با مدل GA بیش از ۶ درصد بهبود داشت و میزان انحراف معیار آن ۳۸ درصد بهتر از مدل GA بود.

جدول ۶- تابع هدف ۱۰ اجرای مستقل مدل در دوره کوتاه مدت (میلیون مترمکعب)

مقدار GA	مقدار ACO <sub>R</sub>	معیار ارزیابی
$0/296 \times 10^6$	$0/28 \times 10^6$	بهترین مقدار
$0/008 \times 10^6$	$0/005 \times 10^6$	انحراف معیار
$0/306 \times 10^6$	$0/2863 \times 10^6$	میانگین
۷۰	۷۰	زمان اجرا (ثانیه)
۲۸۰۰	۱۷۰۰	تعداد تکرارها

شکل ۵ فرایند همگرایی دو الگوریتم نام‌برده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم ژنتیک سریع‌تر به جوابهای بهتر همگرا می‌شود اما در تکرارهای بعدی هر دو الگوریتم پایه‌پای هم پیش می‌روند و در نهایت الگوریتم مورچگان به جواب بهتری دست پیدا می‌کند.

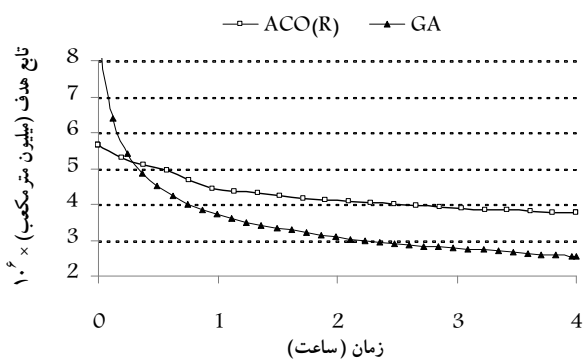
وجود الگوریتم مورچگان پیوسته با اصلاحاتی که در نظر گرفته شد قابل رقابت با الگوریتم شناخته شده ژنتیک در حل مسائل پیچیده منابع آب است. ادامه تحقیقات در این زمینه می‌تواند به بهبود هر چه بیشتر این روش مطرح و نوپا منجر شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کاربرد الگوریتم‌های ژنتیک و مورچگان پیوسته در یک سیستم چندمخزنی پیچیده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و پیچیدگی‌های مسئله با بهینه‌سازی در طول زمان و مکان، هیچ‌یک از روشها قادر به دستیابی به حل بهینه مطلق نبودند. برای حل چنین سیستم پیچیده‌ای لازم بود، نقطه شروع مدل‌ها از حالت تصادفی خارج شده و در تعیین حل شروع از ترفندهایی استفاده شود. برای دستیابی به چنین هدفی در هر دو الگوریتم، از نتایج یک مدل کوتاه مدت استفاده شد. نتایج حاصل از مدل کوتاه مدت در این کاربرد، نشان‌دهنده برتری الگوریتم مورچه پیوسته نسبت به ژنتیک بود. همچنین، در الگوریتم مورچه از روش دومی برای تشکیل آرشیو اولیه استفاده گردید که منجر به نتایج بهتری نسبت به روش اول شد.

اجرای مدل‌های ژنتیک و مورچه پیوسته در مدل دراز مدت با اصلاحات یادشده، بهبود محسوس نتایج را نشان داد. کاربرد روش دوم در تشکیل آرشیو اولیه در الگوریتم مورچگان حتی به نتایج بسیار بهتری منجر شد. این نتایج و روند مشاهده شده در کاربرد الگوریتم مورچگان پیوسته در سیستم‌های پیچیده منابع آب بسار نوید بخش است و انتظار می‌رود ادامه تحقیقات در این زمینه به بهبود هرچه بیشتر این روش مطرح و نوپا منجر شود.

به منظور ارزیابی همگرایی مدل‌ها در زمان‌های طولانی‌تر، با استفاده از روش دوم  $ACO_R$  اجازه داده شد هر دو مدل تا ۴ ساعت به اجرای خود ادامه دهند. در این مرحله، مقدار تابع هدف در مدل  $ACO_R$  برابر  $3/75 \times 10^6$  به دست آمد که حدود ۵۰ درصد نسبت به نتایج مدل GA با مقدار  $2/50 \times 10^6$ ، ضعیف‌تر بود. میزان روند همگرایی دو مدل پس از ۴ ساعت در شکل ۶ نشان داده شده است. حل بهینه سراسری حاصل از برنامه لینگو در این مسئله برابر با  $0/525 \times 10^6$  میلیون مترمکعب است. به طوری که مشاهده می‌شود اختلاف بهترین حل‌های حاصل از روش‌های فراکاوشی با حل سراسری زیاد است. علت این موضوع تعداد بسیار زیاد متغیرهای تصمیم (۳۹۴۸ متغیر) می‌باشد. این تعداد متغیر تصمیم، حل مسئله را توسط هر الگوریتم شناخته شده‌ای با چالش جدی روبرو می‌کند.



شکل ۶- میزان روند همگرایی دو مدل ژنتیک و مورچگان پس از ۴ ساعت (بهترین حل)

بنابراین با اضافه شدن زمان اجرا، عملکرد الگوریتم GA بهبود بیشتری در مقایسه با الگوریتم  $ACO_R$  از خود نشان می‌دهد. با این

#### ۵- مراجع

- 1- Simonovic, S. P. (2000). "Tools for water management-one view of the future." *Water International*, 25(1), 76-88.
- 2- Labadie, J. W. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review." *J. of Water Resources Planning and Management*, 130(2), 93-111
- 3- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Addison-Wesley, Inc. Reading, Massachusetts.
- 4- Gen, M., and Cheng, R. (1997). *Genetic algorithms and Engineering design*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- 5- Holland, J. H. (1975). *Adsorption in natural and artificial systems*, The university of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- 6- Esat, V., and Hall, M. J. (1994). "Water resources system optimization using genetic algorithm." *Hydroinformatics*, 94, 225-231.
- 7- Oliveira, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multireservoir systems." *Water Resources Research*, 33(4), 839-852.

- 8- Wardlaw, R., and Sharif, M. (1999). "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation." *J. of Water Resources Planning and Management*, 125(1), 25-33.
- 9- Sharif, M., and Wardlaw, R. (2000). "Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: Case study." *J. of Computing in Civil Engineering*, 14(4), 255-263.
- 10- Cai, X., McKinney, D. C., and Lasdon, L. S. (2001). "Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach." *Advances in Water Resources*, 24(6), 667-676.
- 11- Chen, L. (2003). "Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation." *J. of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 39(5), 1157-1165.
- 12- Tung, C. P., Hsu, S. Y., Liu, C. M., and Li, Jr. Sh. (2003). "Application of the genetic algorithm for optimizing operation rules of the LiYuTan reservoir in Taiwan." *J. of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 39(3), 649-657.
- 13- Momtahn, Sh., and Borhani Darian, A. (2006). "Genetic algorithm (GA) method for optimization of mlti-reservoir system operation." *J. of Water and Wastewater*, 56, 11-20. (In Persian)
- 14- Momtahn, Sh., and Borhani Dariane, A. (2007). "Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies." *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 202-209.
- 15- Dariane, A. B., and Momtahn, Sh. (2009). "Optimization of multireservoir systems operation using modified direct search genetic algorithm." *J. of Water Resources Planning and Management*, 135(3), 141-148.
- 16- Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Van Genuchten, M.T. (2001). "Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization." *Advances in Water Resources*, 24(8), 827-841.
- 17- Kumar, D. N., and Reddy, M. J. (2006). "Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation." *J. of Water Resources Management*, 20(6), 879-898.
- 18- Jalali, M. R., Afshar, A., and Marino, M.A. (2007). "Multi-Colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problem." *Water Resources Management*, 21, 1429-1447.
- 19- Zecchin, A.C., Maier, H. R., Simpson, A. R., Leonard, M., and Nixon, J. B. (2007). "Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms." *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 87-92.
- 20- Borhani Darian, A., and Mortazavi Naeini, S. M. (2009). "Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources." *J. of Water and Wastewater*, 68, 57-66. (In Persian)
- 21- Socha, K., and Dorigo, M. (2008). "Ant colony optimization for continuous domains." *European J. of Operational Research*, 185(3), 1155-1173.
- 22- Dariane, A. B., and Moradi, A. M. (2008). "Reservoir operating by ant colony optimization for continuous domains (ACO<sub>R</sub>) case study: Dez reservoir." *International J. of Eng., and Natural Sciences*, 3(2), 125-129.
- 23- Moradi, A. M., and Dariane, A.B. (2009). "Particle swarm optimization: Application to reservoir operation problems." *IEEE International, Advance Computing Conf.*, Patiala, India, 1048-1051.
- 24- Box, G. E. P., and Muller, M. E. (1958). "A note on the generation of random normal deviates." *Annals of Math. Statistics*, 29 (2), 610-611.
- 25- Guntsch, M., and Middendorf, M. (2002). "A population based approach for ACO." In: Cagnoni, S., Gottlieb, J., Hart, E., Middendorf, M., and Raidl, G. (Eds.), *Applications of Evolutionary Computing*, Proc. of Evo Workshops 2002: EvoCOP, EvoIASP, EvoSTim, Springer-Verlag, Berlin, Germany, vol. 2279 of LNCS, 71-80.
- 26- Water and Power Resources Development Co. (2009). <<http://en.iwpc.ir/default.aspx>>, (May 2009).
- 27- Mühlenbein, H., and Schlierkamp-Voosen, D. (1993). "Predictive models for the breeder genetic algorithm." *Evolutionary Computation*, 1 (1), 25-49.