

مقایسه کاربرد روشهای کاوشی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب

علیرضا برهانی داریان^۱

سید محمد مرتضوی نائینی^۲

(دریافت ۸۶/۸/۱ پذیرش ۸۷/۸/۷)

چکیده

از آنجا که بهینه‌سازی مسائل سیستم‌های منابع آب دارای پیچیدگی‌هایی است که بعضاً حل آنها با روشهای بهینه‌سازی معمول امکان‌پذیر نیست و یا حداقل از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد، تحقیقات فراوانی به منظور یافتن روشهای مناسب برای حل این مسائل صورت گرفته است. در سالهای اخیر روشهای بهینه‌سازی کاوشی همچون الگوریتم ژنتیک در مهندسی سیستم ارائه شده است. کاربردهای اولیه این روشها در مسائل منابع آب نشان داده است که بعضی از آنها ابزارهای قدرتمندی در حل مسائل پیچیده هستند. در مقاله حاضر کاربرد روشهای کاوشی چون الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچه در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور این مطالعات به طور موردی بر روی مخزن دز انجام گرفت. این روشها برای مدل کوتاه مدت (یک‌ساله) و بلند مدت مورد استفاده قرار گرفته و مقایسه شدند. مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در مجموع، الگوریتم ژنتیک کارایی بهتری نسبت به الگوریتم مورچه با برنامه‌ریزی پویا در یافتن جواب بهینه و منحنی‌های فرمان دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، بهره‌برداری مخزن، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مورچگان، برنامه‌ریزی پویا.

Comparison of Heuristic Methods Applied for Optimal Operation of Water Resources

Alireza Borhani Dariane¹

Seyed Mohammad Mortazavi Naeini²

(Received Oct. 22, 2007 Accepted Oct. 28, 2008)

Abstract

Water resources optimization problems are usually complex and hard to solve using the ordinary optimization methods, or they are at least not economically efficient. A great number of studies have been conducted in quest of suitable methods capable of handling such problems. In recent years, some new heuristic methods such as genetic and ant algorithms have been introduced in systems engineering. Preliminary applications of these methods in water resources problems have shown that some of them are powerful tools, capable of solving complex problems. In this paper, the application of such heuristic methods as Genetic Algorithm (GA) and Ant Colony Optimization (ACO) have been studied for optimizing reservoir operation. The Dez Dam reservoir in Iran was chosen for a case study. The methods were applied and compared using short-term (one year) and long-term models. Comparison of the results showed that GA outperforms both DP and ACO in finding true global optimum solutions and operating rules.

Keywords: Optimization, Operation, Genetic Algorithm, Ant Colony Optimization, Dynamic Programming.

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

2. Instructor, of Water Resources Management, Dept. of Civil Engineering, Khajeh-Nasir Toosi University of Technology, Tehran

۱- دانشجویار گروه منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران. (نویسنده مسئول) dariania@yahoo.com (۰۲۱) ۸۸۷۷۹۴۷۳

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

کامپیوتر دارد [۳]. سپس، اولیوریا^{۱۰} و لاکس^{۱۱}، از GA برای برنامه‌ریزی سیستم‌های چند مخزنه استفاده نموده و آنها نیز آن را یک روش کاربردی و قوی یافته و نتیجه گرفتند که GA می‌تواند برای یافتن سیاست‌های بهره‌برداری مختلف، مورد استفاده قرار گیرد [۴]. همچنین، واردلاو^{۱۲} و شریف، روشهای مختلف عملگرهای ژنتیکی را تشریح نموده و سپس، مشابه ایسات و هال، از GA در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی مسئله چهار مخزنه معروف بهره‌جستند [۳ و ۵]. آنها کار ایسات و هال را ارزیابی نموده و قابلیت GA را برای بهره‌برداری بهنگام^{۱۳} مخازن با پیش‌بینی جریان استوکاستیک بررسی نمودند. برخلاف ایسات و هال، که شرح دقیق و مشخصی از روند GA ارائه نکرده بودند، واردلاو و شریف به تشریح روشهای مختلف عملگرهای ژنتیکی پرداختند و نحوه عمل هر یک از این عملگرها را در مسئله معروف چهار مخزنه ارائه کردند. آنها سپس یک مسئله چند مخزنی را با GA حل نمودند تا نشان دهند که GA قابلیت حل مسائل پیچیده با تابع هدف و قیود غیر خطی را نیز دارد. کار آنها از جهتی نیز با کار اولیوریا و لاکس متفاوت بود، زیرا اولیوریا و لاکس بهینه‌سازی پارامترهای سیاست بهره‌برداری را با توجه به آزادسازی‌های قطعی بهنگام مخزن انجام داده بودند. شریف و واردلاو با توجه به قابلیت‌های GA که در مقاله قبلی خود به آنها اشاره کرده بودند از GA در برنامه‌ریزی یک مخزن چند منظوره استفاده کردند و نتایج به‌دست آمده را با روش DDDP^{۱۴} مقایسه نمودند [۶].

چن^{۱۵} از روش الگوریتم ژنتیک با کدگذاری حقیقی برای به دست آوردن منحنی فرمان ده روزه برای یک مخزن استفاده نمود [۷]. او برای ارزیابی کارایی GA، از شبیه‌سازی استفاده نمود و نهایتاً چنین نتیجه گرفت که منحنی فرمان به‌دست آمده با الگوریتم ژنتیک می‌تواند کمبود آبی را حداقل سازد و ارتفاع آب مخزن را در سطح بالایی نگه دارد. ممتحن و برهانی داریان، کاربرد الگوریتم ژنتیک را با ساختارهای مختلف منحنی فرمان^{۱۶} و نیز به صورت ترکیبی با سایر روشها مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که GA قابلیت بسیار بالایی در حل مسائل بهینه‌سازی داشته و از برخی ویژگی‌های خاص بهره‌مند است که نظیر آن در هیچ یک از روشهای دیگر یافت نمی‌شود [۸ و ۹]. آنها همچنین استفاده از GA را در سیستم‌های متوسط تا بسیار بزرگ بررسی نموده و با ارائه روش طول متغیر دوره شبیه‌سازی و نیز اصلاحاتی در عملگرهای GA به خصوص

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی در جهان به خصوص در سیستم‌های تولید، به طور طبیعی بسیار پیچیده و مشکل هستند و نمی‌توان آنها را به‌وسیله روشهای بهینه‌سازی معمول حل نمود. روشهای کلاسیک اغلب مشکل ابعادی و زمان محاسبات دارند و با بزرگ شدن سیستم این مشکل حادث می‌شود تا جایی که در سیستم‌های ۵ یا ۶ مخزنی به بالا عملاً امکان استفاده از روشهای کلاسیک نظیر SDP^۱ وجود ندارد. از اینرو در دهه‌های اخیر محققان توجه زیادی به روشهای کاوشی^۲ داشته‌اند. در این مقاله سعی بر آن است تا کارایی دو مورد از این روشها یعنی الگوریتم مورچگان^۳ و الگوریتم ژنتیک^۴ در زمینه منابع آب بررسی گردد.

روش مورچگان از اوایل دهه ۱۹۹۰ به عنوان یکی از روشهای تکاملی برای حل مسائل ترکیبی^۵ معرفی گردیده و تاکنون کاربردهای محدودی در زمینه منابع آب از آن به چاپ رسیده است. دوریگو^۶ این الگوریتم را در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار با حل مسئله فروشنده دوره گرد^۷ در قالب رساله دکترای خود معرفی نمود [۱]. این الگوریتم تاکنون در مورد تعدادی از مسائل بهینه‌سازی پایه‌ای نیز به طور موفق به کار گرفته شده است. اغلب این مسائل از نوع ترکیبی می‌باشند و ساختاری با تصمیم‌گیری در فضای گسسته، مشابه مسئله فروشنده دوره گرد، دارند.

در مقایسه با الگوریتم مورچگان، قدمت و کاربرد الگوریتم ژنتیک بیشتر است. از دهه ۱۹۶۰ توجه به روشهای الهام گرفته از طبیعت به منظور حل مسائل سیستم افزایش یافت. از میان روشهای مورد کنکاش، الگوریتم ژنتیک از شهرت بیشتری برخوردار است [۲]. همچنین، در مقایسه با الگوریتم مورچگان، الگوریتم ژنتیک از کاربرد بسیار بیشتری برخوردار بوده و محققان بسیاری بر روی این روش کار کرده‌اند. روش ژنتیک توانسته است بر بسیاری از مشکلات روشهای سنتی موجود فائق آمده و خود را به عنوان یک روش ممتاز معرفی نماید. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط هولند معرفی شد.

در اولین کاربردهای منابع آب، ایسات^۸ و هال^۹، GA را در یک مسئله چهار مخزنه معروف به کار برده و به درستی نتیجه گرفتند که GA پتانسیل مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی منابع آب دارد و استفاده از آن صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان و حافظه

¹ Stochastic Dynamic Programming

² Heuristic

³ Ant Algorithm

⁴ Genetic Algorithm(GA)

⁵ Combinatorial

⁶ Dorigo

⁷ Traveling Salesman Problem (TSP)

⁸ Esat

⁹ Hall

¹⁰ Oliveria

¹¹ Loucks

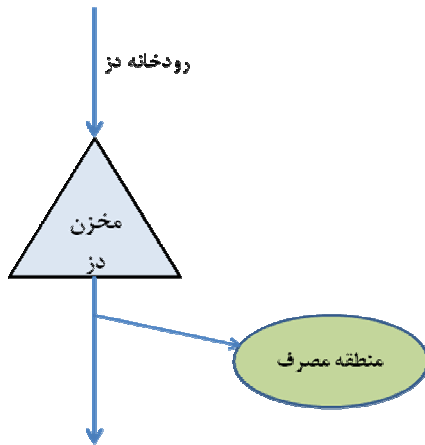
¹² Wardlaw

¹³ Real-time

¹⁴ Differential Discrete Dynamic Programming

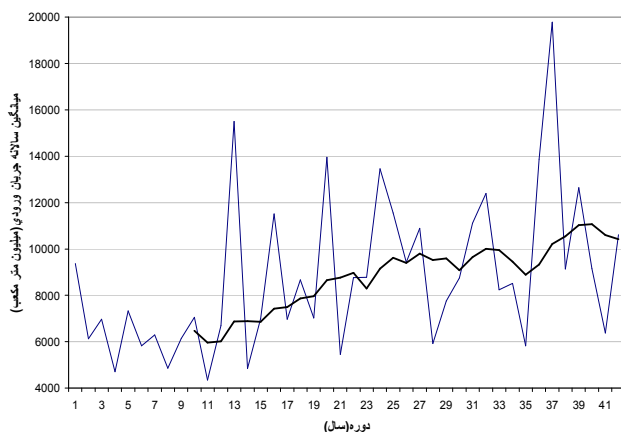
¹⁵ Chen

¹⁶ Rule Curves



شکل ۱- نمایی شماتیک از سیستم دز

البته به منظور ایجاد وضعیت کمبود شدید و برای آنکه تفاوت مقدار تابع هدف در روشهای مختلف مشخص گردد، نیازها دو برابر مقادیر ارائه شده در آن مرجع منظور گردید. ظرفیت ذخیره حداقل معادل ۶۵ میلیون مترمکعب و ظرفیت ذخیره حداکثر معادل ۳۴۶۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. در شکل ۲، سری زمانی دبی ورودی به مخزن به همراه میانگین متحرک ۱۰ ساله نشان داده شده است.



شکل ۲- سری جریان ورودی به مخزن به همراه میانگین متحرک (۱۰ ساله)

در جدولهای ۱ و ۲ توزیع ماهانه متوسط تبخیر، بارش و همچنین توزیع ماهانه نیاز کل ارائه شده است.

جدول ۱- توزیع ماهانه متوسط ارتفاع تبخیر از سطح آزاد آب و بارش در محل سد مخزنی دز (میلی متر) [۱۶]

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۲۱۰/۸	۱۳۴	۸۸/۱	۶۹/۷	۷۵/۳	۸۵	۱۴۰	۲۰۸/۶	۲۷۲/۷	۲۶۸/۷	۲۸۰	۲۷۵/۴
۲/۴	۴۱/۲	۸۱	۰/۱۰۳	۱۰۰/۷	۶۸/۶	۷۱/۸	۱۷/۲	۱	۰	۰	۰

عملگر جهش امکان استفاده از این روش را در سیستم‌های بسیار بزرگ به وجود آوردند [۱۰]. آنها روش اصلاحی را با موفقیت در سیستم ۱۶ مخزنی کارون بزرگ (شامل مخازنی در حوضه‌های دز و کارون) با اهداف مختلف به کار بردند.

برخلاف وجود گزارشهای مختلف در زمینه کاربرد GA در مسائل مهندسی منابع آب، برای الگوریتم مورچگان در این زمینه گزارشهای زیادی موجود نمی‌باشد. در یکی از این موارد عباسپور و همکاران از الگوریتم مورچگان برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک غیر اشباع بهره جستند [۱۱]. همچنین، مایر و همکاران از این روش برای طراحی بهینه سیستم آبرسانی شهری، و جلالی و همکاران الگوریتم مورچه را برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن استفاده نمودند [۱۲ و ۱۳]. همچنین، مرتضوی و دهقانی از این الگوریتم برای بهینه‌سازی مقاطع سدهای وزنی بتنی سود جستند. علاوه بر آن، مرتضوی و برهانی از این الگوریتم در واسنجی بارش-رواناب استفاده کردند [۱۴ و ۱۵]. در مقاله حاضر، کاربرد الگوریتم‌های مورچگان و ژنتیک در بهره‌برداری بهینه از مخزن دز بررسی و ارزیابی شده و با روشهای دیگر چون برنامه‌ریزی پویا مقایسه گشته است.

۲- مطالعه موردی: مخزن دز

سد دز، بلندترین سد دو قوسی ایران است که در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر دزفول و ۲۲ کیلومتری اندیشک در دره‌ای عمیق با دیواره‌های عمودی که تا ارتفاع ۵۰۰ متر بالا رفته‌اند، بر روی شاخه اصلی رودخانه دز و در ۱۰۰ کیلومتری بالادست محل اتصال دو رودخانه دز و کارون احداث گردیده است. در شکل ۱ به صورت شماتیک سیستم سد مخزنی دز نشان داده شده است.

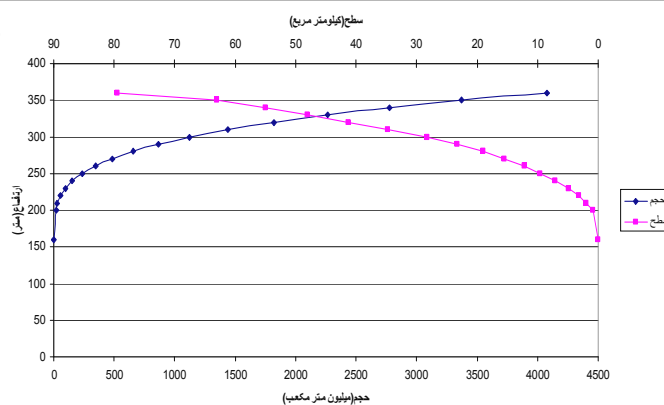
آمار و اطلاعات استفاده شده عبارت‌اند از: آمار ۴۲ ساله جریان‌های ورودی تاریخی، ظرفیتهای ذخیره حداقل و حداکثر در ماههای مختلف، ارتفاع متوسط تبخیر، نیاز کل در ماههای مختلف و منحنی سطح-حجم-ارتفاع. همه اطلاعات فوق براساس مقادیر ارائه شده در نظر گرفته شد [۱۶].

جدول ۲- توزیع ماهانه نیاز کل (مجموع کشاورزی، صنعت و شرب) (میلیون متر مکعب) [۱۶]

نیاز	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
	۴۷۱	۳۵۷	۲۰۶	۱۸۴	۲۵۶	۴۵۸	۶۱۳	۶۵۸	۷۴۳	۸۴۳	۸۴۷	۶۸۷

همچنین در شکل ۳ رابطه سطح-حجم-ارتفاع سد دز نمایش

داده شده است.



شکل ۳- منحنی سطح-حجم-ارتفاع سد دز

بهبینه‌سازی برای ۴۲ سال اجرا شد. در هر یک از مدل‌ها یک حجم اولیه شروع در دوره اول در نظر گرفته شد و سپس حجم انتهایی هر دوره متناسب با روش مورد نظر تولید گردید. سپس، با توجه به رابطه تعادل جرمی که در رابطه ۱ نشان داده شده است، میزان رهاسازی برای همه دوره‌ها محاسبه گردید.

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

که در آن

S ، Q و E به ترتیب ذخیره اول دوره، ورودی در طی دوره و حجم تبخیر از سطح مخزن در طی دوره هستند. R نیز میزان رهاسازی است. در ضمن واحدها به صورت حجم و بر حسب میلیون مترمکعب هستند.

با توجه به مقادیر رهاسازی محاسبه شده، تابع هدف در هر یک از روشهای الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم مورچگان مطابق رابطه ۲ فرض شده است.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^T (R_i(t) - TD(t))^2 \quad t = 1, \dots, 12 \quad (2)$$

که در آن

TD میزان نیاز ماهانه می‌باشد.

همچنین، در هر مدل دو حالت مختلف می‌توان فرض نمود. یک حالت این است که میزان حجم انتهایی دوره آخر، آزاد بوده و مستقل از حجم اولیه است. حالت دیگر چنین فرض می‌شود که حجم انتهایی دوره آخر مقید بوده و از حجم اولیه مستقل نیست. این حالتها در ادامه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴- روشهای حل سیستم

۴-۱- الگوریتم ژنتیک

روش کار در GA به این ترتیب است که ابتدا یک نسل تصادفی تولید می‌گردد. سپس با اعمال عملگر انتخاب، نسل بعدی انتخاب می‌شود. در ادامه، عملگرهای ترکیب و جهش بر روی نسل انتخاب شده، اعمال می‌شوند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد سعی‌ها به پایان برسد یا اینکه تابع هدف برای چند نسل متوالی تغییری نداشته باشد. ترکیب، اصلی‌ترین عملگر ژنتیک است. این عملگر در یک زمان بر روی دو کروموزوم عمل نموده و با ترکیب آنها یک کروموزوم جدید تولید می‌کند. کارایی الگوریتم ژنتیک به

۳- مدل‌های بهره‌برداری

در این مقاله برای نشان دادن کارایی الگوریتم‌های ژنتیک و مورچگان حل سیستم در دو دوره متفاوت به طور کاربردی بر روی مخزن دز در نظر گرفته می‌شود. مدل‌هایی که کوتاه مدت نامیده می‌شوند، مدل‌هایی هستند که دارای دوره دوازده ماهه می‌باشند و برای مقایسه و ارزیابی انواع الگوریتم‌های مورچگان مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مرحله دوم یک دوره بلند مدت با استفاده از آمار تاریخی ۴۲ ساله (از سال آبی ۳۶-۱۳۳۵ تا ۷۷-۱۳۷۶) ورودی به مخزن برای تهیه مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۱- مدل‌های کوتاه مدت و بلند مدت

بهره‌برداری از مخازن، یک فرایند تصمیم‌گیری پیچیده است که شامل قیود و متغیرهای زیادی می‌باشد. در عین حال، بسیاری از این قیود و متغیرها غیرقطعی هستند که این موضوع خود پیچیدگی سیستم تصمیم‌گیری را مضاعف می‌نماید. یکی از راهکارهای بهره‌برداری از مخازن استفاده از منحنی فرمان است. در این قسمت سعی شد با استفاده از آمار تاریخی ۴۲ ساله مخزن دز و با به‌کارگیری روشهای الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم مورچگان یک منحنی فرمان بهینه استخراج گردد. برای بهتر نشان دادن کارایی روشهای مختلف، مدل‌ها به دو صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت تعریف شدند. در نوع کوتاه مدت، مدل تنها برای یک سال و با استفاده از دبی میانگین اجرا گردید. اما در مدل بلندمدت،

$$\eta_{ij}(t) = 1 / ([R_{ij}(t) - TD(t)]^2 + c) \quad (3)$$

که در آن

i کلاس حجم مخزن در دوره t ، J_k کلاس حجم مخزن در دوره $t+1$ و c مقدار کوچک مثبتی است برای جلوگیری از تقسیم شدن بر صفر، $R_{ij}(t)$ نشان دهنده میزان رهاسازی از مخزن در دوره t و $TD(t)$ نشانگر نیاز در دوره t است.

روش کار به این شکل است که هر مورچه در هر دوره در یک کلاس حجم مخزن قرار دارد و باید تصمیم بگیرد که در دوره بعد به کدامین کلاس حجم مخزن برود. مورچه‌ها برای انتخاب کلاس بعدی از رابطه احتمالاتی زیر استفاده می‌نمایند.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_k(i)} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta} & \text{if } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{if } j \notin J_k(i) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن

α و β پارامترهای قابل تنظیمی هستند که وزن $\tau_{ij}(t)$ و η_{ij} را در محاسبه کنترل می‌کنند، p_{ij} احتمال انتخاب گره j توسط مورچه k از گره i و $\tau_{ij}(t)$ میزان فرومون بر روی مسیر بین گره i و j در دوره t است.

در مرحله اول بر روی تمامی مسیرها مقداری فرومون در نظر گرفته می‌شود. میزان اولیه فرومون در مسیرها مقدار ثابت کوچک و مثبت τ_0 است (به طور مثال، یک توزیع یکنواخت از میزان فرومون در $t=0$ در همه مسیرها وجود دارد).

بدیهی است، در رابطه ۴ هر مورچه فقط مجاز به انتخاب کلاس‌هایی از حجم مخزن در دوره $t+1$ است که میزان رهاسازی آن در دوره t مجاز باشد. پس از آنکه تمام مورچه‌ها مسیر خود را پیمودند، برای هر مورچه با توجه به مسیر پیموده شده و محاسبه میزان رهاسازی مطابق رابطه ۲ تابع هدف محاسبه می‌شود.

گام بعدی، تعیین میزان فرومون در هر یک از مسیرها می‌باشد. چنانچه از روش سیستم مورچگان استفاده گردد، میزان فرومون هر مورچه بر مسیر طی شده توسط آن مورچه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} V / TDS_k & \text{if } (i,j) \in T_k(t) \\ 0 & \text{if } (i,j) \notin T_k(t) \end{cases} \quad (5)$$

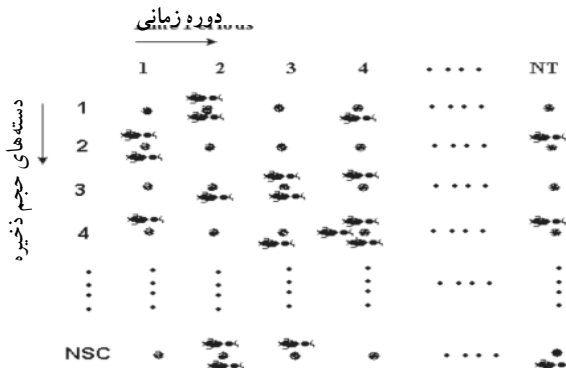
که در آن

V پارامتری قابل تنظیم است که در طول حل، مقدار آن ثابت می‌ماند و TDS_k تابع هدف به دست آمده توسط مورچه k ام است. مورچه‌ها برای رسیدن به جواب از قوانین انتقال احتمالاتی استفاده می‌کنند.

کارایی عملگر ترکیب آن بستگی دارد. نرخ ترکیب (P_c) به صورت نسبت کروموزوم‌های شرکت کننده در پروسه ترکیب به کل جمعیت کروموزوم‌ها تعریف می‌شود. نرخ ترکیب برابر $0/3$ به این مفهوم است که ۳۰ درصد جمعیت با یکدیگر ترکیب می‌شوند و ۷۰ درصد دست نخورده باقی می‌ماند. این نسبت، تعداد کروموزوم‌هایی را که تحت عمل ترکیب قرار می‌گیرند کنترل می‌کند. نرخ ترکیب بالا اجازه می‌دهد که فضای بیشتری کاوش گردد و احتمال واقع شدن در فضاهای بهینه‌های محلی را کاهش می‌دهد. اما اگر این نرخ خیلی زیاد شود موجب صرف زمان زیادی برای جستجوی فضاهای غیربهینه می‌شود. جهش، عملگری است که تغییرات تصادفی در ژن‌های کروموزوم ایجاد کرده و جوابهایی کاملاً جدید تولید می‌کند. ساده‌ترین راه دستیابی به جهش تغییر یک یا چند ژن کروموزوم است. در الگوریتم ژنتیک جهش نقش اساسی ایفا می‌کند.

۴-۲- الگوریتم مورچه

برای به کارگیری این الگوریتم در هر مسئله باید چند گام طی نمود. اولین گام در به کارگیری الگوریتم مورچه این است که صورت مسئله به گونه‌ای تعریف گردد که بتوان برای مسئله مورد نظر حرکت مورچه‌ها را تعریف نمود. گام دوم، تعریف تابع هدف است. گام بعدی، تعریف رابطه فرومون و تابع هدف، یعنی متغیر کاوشی می‌باشد [۱۷].



شکل ۴- نمایش مسیر عبوری مورچه‌ها در مسئله مخزن [۲]

برای به کارگیری الگوریتم مورچه در مسئله فعلی مطابق شکل ۴، حجم مخزن گسسته گردید. سپس، با توجه به اینکه حجم اولیه در دوره اول مشخص است، مورچه‌ها در این کلاس حجم مخزن قرار داده می‌شوند. تابع هدف هم در این مسئله همان رابطه ۲ است. حال لازم است متغیر کاوشی (η_{ij}) تعریف شود. در این مسئله متغیر کاوشی به شکل زیر تعریف گردید.

¹ Combination Rate

نهایتاً اینکه AS بدون تخییر فرمون نمی تواند خوب کار کند، در واقع برای اینکه کاوش اولیه فضای جستجو بسیار تصادفی است، مقادیر اثرات فرمون در حالت‌های اولیه خیلی ساختار یافته نیستند. به این مفهوم که ممکن است بر روی مسیرهای بهینه تر، فرمون کمتری موجود باشد یا بالعکس، در نتیجه نیاز است که سیستم به آرامی این مقادیر اولیه را فراموش کند تا به مورچگان اجازه دهد که به سمت جوابهای بهتر حرکت کنند. از دست رفتن فرمون به وسیله معرفی ضریب p محقق می شود ($0 < p \leq 1$).

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (7)$$

که در آن

m تعداد مورچگان است.

برای رعایت اختصار، از توضیح نحوه محاسبه میزان فرمون و بهنگام سازی مقادیر آنها در دیگر روشهای الگوریتم مورچه همچون MAX-MIN AS ACS و ... صرف نظر شد. اولین قدم در راه ارتقاء الگوریتم AS، راهکار نخبه گرایی (Elite) AS_e نام گرفت. در این الگوریتم به مسیرهای عبوری توسط مورچگان نخبه، فرمون مازاد تعلق می گیرد. میزان فرمون مازاد عبارت است از $e/f(S_{gb})$ که e تعداد مورچگان نخبه و $f(S_{gb})$ مقدار تابع هدف بهترین جواب جامع^۱ (S_{gb}) می باشد. الگوریتم رتبه بندی مورچگان (AS_{rank}) یک حالت اصلاح شده دیگر از سیستم مورچگان است که در سال ۱۹۹۷ توسط بولنهیم^۲ و همکاران ارائه شد. در این روش تورهای طی شده توسط مورچه ها بر اساس کیفیت حل آنها رتبه بندی می شوند، سپس مسیرهای طی شده توسط مورچه های ممتاز^۳ به تعداد n ، با استفاده از الگوی بهنگام سازی جامع، بهنگام می شوند. علاوه بر اینکه بهترین تورهای هر سعی مشخص می شوند، بهترین تور از میان همه سعی ها نیز به عنوان تور نخبه^۴ تعیین می شود. میزان فرمون بقیه مسیرها تغییری نمی کند.

برای حل مسائل بزرگ تر و مشکل تر، سیستم کلونی مورچه^۵ معرفی گردید [۱۸].

در ACS سه دیدگاه اصلی مطرح است:

۱- در الگوریتم ACS، قانون انتقال احتمالاتی، راه مستقیمی برای ایجاد تعادل، بین کاوش مسیرهای جدید و استفاده از مسیرهای قبلی (اطلاعات گذشته) ایجاد می کند.

۲- دستور بهنگام کردن عمومی تنها برای مسیرهایی که به بهترین تور مورچه تعلق دارند، به کار گرفته می شود.

۳- هنگامی که مورچه ها در حال عبور از مسیرها هستند، دستور بهنگام کردن محلی به کار می رود.

تحقیقات بر روی الگوریتم کلونی مورچه نشان داده است که بهبود در کارایی این الگوریتم زمانی حاصل خواهد شد که الگوریتم بتواند جوابهای خوب خود را به نحوی قوی گسترش دهد. بنابراین، برای دستیابی به بهترین کارایی در الگوریتم ACO باید ترکیبی از بهبود روشهای گسترش بهترین جواب یافته شده در حین جستجو با روشهای مؤثر برای جلوگیری از حالت پایداری زود هنگام وجود داشته باشد. الگوریتم Max-Min AS در واقع برای دستیابی به چنین اهدافی به وجود آمده است.

۵- مطالعه کاربردی

۵-۱- مدل کوتاه مدت

در این مدل کاربرد روشهای DP^۶ و ACO، در بهره برداری بهینه از مخزن دز با در نظر گرفتن آمار یک ساله (۱۲ ماهه) بررسی گردید. در این بخش در مدل DP حجم ابتدایی دوره اول و حجم انتهایی دوره آخر با هم یکسان فرض شده و برابر با ۲۰۰۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شدند.

بر اساس آنچه در روش الگوریتم مورچه توضیح داده شد برای حل مسئله مخزن رویکردهای متفاوتی متصور است. دو رویکرد از نظر نحوه قرارگیری مورچگان و دو رویکرد از منظر نحوه برخورد با نقض قیود مسئله قابل بررسی می باشد. رویکردهای مربوط به قرارگیری مورچگان عبارتند از: الف- مورچگان به طور تصادفی در کلاس های مختلف حجم مخزن در دوره اول قرار گیرند؛ ب- به طور تصادفی در همه کلاس ها و همه دوره ها قرار داده شوند. رویکردهای مربوط به نقض قیود عبارتند از: الف- روش جریمه، ب- روش اصلاح. بنابراین بر اساس رویکردهای فوق برای حل مسئله مخزن با الگوریتم مورچه چهار حالت در نظر گرفته شد. در جدول ۳ این چهار حالت و نتایج حاصل از الگوریتم سیستم مورچگان با رتبه بندی، برای هر یک از آنها نشان داده شده است. این نتایج با فرض ۳۰۰ مورچه، ۳۰۰ سعی، و ۲۵ گسسته سازی به دست آمده اند. پارامترهای الگوریتم یعنی α ، β ، p و τ_0 به ترتیب برابر ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۵ و ۱ فرض گردید. همه محاسبات به وسیله رایانه پنتیوم ۴ با CPU ۲۴۰۰ مگاهرتز و حافظه ۵۱۲ مگابایت انجام گرفته است.

همچنین برای مقایسه، از نتایج برنامه ریزی پویا به عنوان بهینه

¹ Global-Best
² Bullnheimer
³ Ranked Ants
⁴ Elite
⁵ Ant Colony System (ACS)

⁶ Ant Colony Optimization (ACO)
⁷ Dynamic Programming

جدول ۴- مقادیر تابع هدف در روشهای مختلف الگوریتم مورچگان

نام روش	AS	AS+ Elitist	AS+ Rank-Based	ACS	Max-Min AS
تابع هدف ($\times 10^6$)	۱/۷۰	۱/۶۵	۱/۳۵	۱/۳۷	۱/۷۸
زمان اجرا (ثانیه)	۲۸۲۰	۲۸۱۰	۲۹۳۱	۱۷۳۴	۳۵۱۹

در جدول ۵، مقایسه‌ای بین جوابهای بهینه به دست آمده از روش DP و ACO با تعداد گسسته‌سازی مختلف صورت گرفته است. نتایج ACO بر اساس روش سیستم مورچگان با رتبه‌بندی و با فرض α برابر ۰/۱، β برابر ۰/۰۵، ρ برابر ۰/۵ و τ_0 برابر ۱۰۰۰ و با تعداد ۱۵ مورچه و ۱۵۰ سعی در ۱۰ بار اجرا به دست آمده است. اگرچه در تمامی موارد هر دو روش به جوابهای یکسانی دست یافته‌اند، اما به طوری که مشاهده می‌شود الگوریتم مورچه زمان بسیار زیادی برای رسیدن به چنین جوابی صرف کرده است. لذا، با توجه به اینکه روش برنامه‌ریزی پویا در این فضای گسسته به بهینه مطلق دست می‌یابد، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم مورچه در این مسئله ساده، قادر به دستیابی به حل بهینه مطلق گشته و از این جهت با DP برابری می‌کند، اما از لحاظ زمان اجرا و سایر موارد مزیتی بر روش DP ندارد؛ ضمن اینکه مدل‌سازی به روش مورچگان دارای روندی پیچیده‌تر از DP بوده و برخلاف DP، فرایند حل در مورچگان وابستگی شدیدی به پارامترهای فرض شده دارد. البته تعمیم این مطلب به طور کلی امکان‌پذیر نیست، چون مسئله مورد بحث در اینجا یک مسئله نسبتاً ساده است و شاید در مسائل پیچیده‌تر عملکرد روش ACO بهتر یا حداقل برابر روش DP باشد.

جدول ۵- مقایسه نتایج و زمان اجرای روشهای ACO (میانگین ۱۰ اجرا) و DP بر حسب گسسته‌سازی‌های مختلف

تعداد گسسته‌سازی‌ها	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
بهینه-ACO ($\times 10^6$)	۲/۶۴	۱/۴۳	۱/۳۷	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۱
بهینه-DP ($\times 10^6$)	۲/۶۴	۱/۴۳	۱/۳۷	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۱
زمان اجرا-ACO (ثانیه)	۴۸	۱۲۴	۲۵۰	۴۱۶	۶۱۹	۸۸۰
زمان اجرا-DP (ثانیه)	۱۰	۲۰	۲۹	۳۹	۵۰	۶۰

۵-۲- مدل بلند مدت

در این حالت برای بهینه‌سازی رابطه ۲ از آمار طولانی مدت ۴۲ ساله (از سال آبی ۳۶-۱۳۳۵ تا ۷۷-۱۳۷۶) مخزن استفاده شد. در این مقاله برای بررسی تأثیر در نظر گرفتن یک حجم اولیه در بهینه‌سازی، مدل بلندمدت با دو رویکرد استفاده گردید. رویکرد اول به این ترتیب است که یک حجم ذخیره اولیه برای شروع در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از الگوریتم فوق مدل به گونه‌ای حل

مطلق استفاده گردید. از بررسی نتایج جدول ۳ چنین برداشت می‌شود که روش جریمه زمان کمتری به خود اختصاص داده است. از طرفی، چه از روش جریمه و چه از روش اصلاح استفاده شود، قراردعی مورچگان به طور تصادفی در کلاس‌ها و دوره‌های مختلف به نتایج بهتری منجر می‌شود. بر مبنای پاسخهای حاصله، از اینجا به بعد تمام نتایج بر اساس روش جریمه با قراردعی تصادفی مورچگان در کل دوره‌ها و کلاس‌ها به دست آمده است، مگر مواردی که روش دیگری ذکر شده باشد.

جدول ۳- نتایج رویکردهای مختلف در حل مسئله مخزن با

معیارهای ارزیابی	الگوریتم سیستم مورچگان با رتبه‌بندی			
	به طور تصادفی در دوره اول (با جریمه)	به طور تصادفی در دوره اول (با اصلاح)	به طور تصادفی در دوره اول (با جریمه)	به طور تصادفی در دوره اول (با اصلاح)
میانگین توابع هدف در ۱۰ اجرا ($\times 10^6$)	۱/۴۱	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۲
مینیمم توابع هدف در ۱۰ اجرا ($\times 10^6$)	۱/۳۴	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲
ماکسیمم توابع هدف در ۱۰ اجرا ($\times 10^6$)	۱/۴۸	۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۳۲
بهینه مطلق به روش DP ($\times 10^6$)	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲	۱/۳۲
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰
درصد خطا	۲/۱۰	۰/۲۰	۰	۰
زمان اجرا	۳۵۲	۳۳۹	۱۰۳۶	۶۲۴

برای آنکه بتوان الگوریتم مورچه را با روش DP مقایسه نمود، در مدل الگوریتم مورچه نیز قید برابری حجم انتهایی دوره آخر و حجم ابتدایی دوره اول اعمال شد. نتایج به دست آمده از روشهای مختلف الگوریتم مورچگان در جدول ۴ ارائه گردیده است. این روشها عبارت‌اند از روش سیستم مورچگان، سیستم مورچگان با نخبه‌گرایی، سیستم مورچگان با رتبه‌بندی، سیستم کلونی مورچگان و Max-Min AS.

از نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشخص است که روش سیستم مورچگان با رتبه‌بندی^۱ به جواب بهتری دست یافته است. اما چنانچه زمان اجرا هم مد نظر گرفته شود، مشخص می‌گردد که روش سیستم کلونی مورچگان (ACS) از کارایی بهتری برخوردار بوده است، زیرا در زمان بسیار کمتری توانسته است به جوابی در همان حدود جواب روش سیستم مورچگان با رتبه‌بندی دست یابد. نتایج جدول ۴ برای یک‌بار اجرا با فرضیات ۳۰۰ مورچه، ۳۰۰ سعی و ۲۰ گسسته‌سازی به دست آمده‌اند. پارامترهای الگوریتم معادل α ، ρ ، τ_0 و به ترتیب برابر ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۵ و ۱ فرض گردید.

^۱ AS+Rank Based

جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک در رویکرد اول و دوم

تابع هدف	رویکرد ۱	رویکرد ۲
میانگین ($\times 10^6$)	۹۳/۲۸	۹۱/۴۷
ماکسیم ($\times 10^6$)	۹۴/۱۸	۹۲/۸۶
مینیم ($\times 10^6$)	۹۲/۷۰	۹۰/۴۶
انحراف معیار	۰/۴۵	۰/۷۴

جدول ۸- نتایج روش ACO برای دو گسسته‌سازی مختلف

پارامتر	تعداد گسسته‌سازی‌ها	
	۱۰	۱۵
میانگین توابع هدف در ۵ اجرا ($\times 10^6$)	۱۸۰/۶۷	۱۷۹/۹۲
مینیم توابع هدف در ۵ اجرا ($\times 10^6$)	۱۷۷/۲۶	۱۷۴/۴۷
ماکسیم توابع هدف در ۵ اجرا ($\times 10^6$)	۱۸۵/۷۹	۱۸۵/۸۱
انحراف معیار	۳/۹۴	۴/۸۸
زمان اجرا	۵۲۸۶	۱۱۸۲۷

گسسته‌سازی‌ها مقدار تابع هدف بهتر شده است، اما میزان انحراف معیار، پاسخهای مختلف افزایش یافته است. این موضوع نشان دهنده آن است که با افزایش گسسته‌سازی، پراکندگی جوابها افزایش می‌یابد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد گسسته‌سازی‌ها زمان اجرا نیز افزایش یافته است.

در جدول ۹ مقایسه‌ای بین نتایج روشهای مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج برنامه‌ریزی پویا با ۱۵ گسسته‌سازی بسیار نزدیک به نتایج الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده است. از طرف دیگر، الگوریتم مورچه علی‌رغم آنکه زمان زیادی صرف نموده است، نتوانسته به جواب قابل قبولی دست یابد. انحراف معیار جوابهای به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک بسیار کمتر از انحراف معیار جوابهای الگوریتم مورچه است و این موضوع نشان‌دهنده آن است که الگوریتم ژنتیک در هدایت مسیر جستجو موفق‌تر بوده است.

جدول ۹- مقایسه نتایج روشهای مختلف

روش	تعداد گسسته‌سازی	تابع هدف ($\times 10^6$)	انحراف معیار	زمان اجرا (ثانیه)
GA	-	۹۲/۷۰	۰/۴۵	۲۹۶۲
DP	۱۰	۹۹/۷۵	-----	۱۴۱
	۱۵	۹۲/۸۹	-----	۳۱۴
ACO	۱۰	۱۷۷/۲۶	۳/۹۴	۵۲۸۶
	۱۵	۱۷۷/۴۳	۱/۹۰	۱۱۸۳۲

می‌شود که حجم انتهایی دوره T ام (دوره پایانی) با حجم شروع یکسان گردد. رویکرد دوم این است که الگوریتم در انتخاب هر یک از کلاس‌های حجم مخزن در دوره انتهایی آزاد باشد.

در رویکرد اول در روش DP در واقع در t برابر ۱، فقط یک متغیر حالت و در زمان t برابر T تنها یک متغیر تصمیم وجود دارد و در رویکرد دوم فقط این شرط اعمال می‌گردد که در t برابر ۱، تنها یک متغیر حالت وجود داشته باشد. از روش موران^۱ برای گسسته‌سازی استفاده شد. مانند مدل‌های قبلی، در این مدل نیز با فرض حجم اولیه ۲۰۰۰ میلیون مترمکعب و ۱۰ و ۱۵ گسسته‌سازی، مدل حل گردید که نتایج به‌دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج روش DP با دو رویکرد

روش	تعداد گسسته‌سازی‌ها	تابع هدف ($\times 10^6$)	زمان (ثانیه)
رویکرد اول	۱۰	۹۹/۷۵	۱۴۱
	۱۵	۹۲/۹۸	۳۱۴
رویکرد دوم	۱۰	۹۷/۶۷	۱۳۵
	۱۵	۹۰/۸۹	۳۱۸

همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد گسسته‌سازی‌های مخزن نتایج بهتری به‌دست آمده است اما در عین حال زمان اجرا نیز افزایش یافته است. همچنین، از نتایج مشخص است که در حالتی که برای حجم انتهایی شرطی اعمال نگردد، جوابهای نسبتاً بهتری حاصل خواهد شد. دلیل این موضوع هم، استفاده از تمام حجم مخزن در تأمین نیاز دوره‌های انتهایی است. لکن بدیهی است که عملاً این رویکرد روش مناسبی نیست. زیرا مدل در این حالت از آب موجود در اختلاف ذخیره دوره اول و آخر استفاده می‌نماید و اگرچه این آب اضافی باعث بهتر شدن کارایی ظاهری مدل در رویکرد دوم می‌شود اما در واقع چنین کاری مجاز نبوده و نتیجه حاصل دور از واقعیت است. همچنین، مشخص است که هر چه طول دوره بیشتر باشد، اختلاف این دو رویکرد در پارامترهای عملکردی کمتر خواهد بود.

در جدول ۷ نتایج به دست آمده از حل مدل با الگوریتم ژنتیک در دو رویکرد ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج مشخص است در اینجا نیز عملکرد دو رویکرد، مشابه مدل DP می‌باشد. این روند در کاربرد الگوریتم مورچگان نیز مشاهده گردید. لذا از این به بعد صرفاً روی نتایج رویکرد اول بحث خواهد شد.

در جدول ۸ نتایج کاربرد روش ACO با ۱۰ و ۱۵ گسسته‌سازی ارائه شده است. در اینجا نیز با افزایش تعداد

¹ Moran

به طوری که مشاهده می‌شود الگوریتم مورچه اگرچه در مسائل بزرگ دارای نقاط ضعف است لکن در مسائل کوچک قادر است به جوابی برابر با DP دست یابد. یکی از مشکلات عمده روش مورچه صرف زمان زیاد برای یافتن جواب نهایی است. همچنین، لازم به ذکر است که الگوریتم مورچه در مسائل ترکیبی عملکردی به مراتب بهتر، از خود نشان می‌دهد [۱۵].

۶- جمع‌بندی

از آنجا که بهینه‌سازی یکی از ابزارهای اصلی در مدیریت صحیح است، در این مقاله سعی شده است کارایی روشهای نوینی چون الگوریتم ژنتیک و مورچه در بهره‌برداری بهینه از منابع آب مشخص گردد. از اینرو حل سیستم در دو دوره متفاوت به طور کاربردی بر روی مخزن دز در نظر گرفته شد. در حالت اول که برای یک دوره کوتاه مدت ۱۲ ماهه در نظر گرفته شده بود، با استفاده از روشهای DP و ACO بهره‌برداری از مخزن، بهینه‌سازی گردید. نتایج به دست آمده از این سیستم نشان داد که اگرچه روشهای DP و ACO در دست یافتن به جواب بهینه تفاوتی ندارند اما از نظر زمان اجرا، روش مورچه بسیار به طول می‌انجامد و تفاوت قابل ملاحظه‌ای با روش DP دارد. در مرحله دوم یک دوره بلند مدت در نظر گرفته شده و با استفاده از روشهای GA، DP و ACO بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای مدت ۴۲ سال با گام ماهانه انجام گردید. نتایج به دست آمده از حل این سیستم کارایی الگوریتم ژنتیک را در مقایسه با دو روش دیگر نشان می‌دهد.

به این ترتیب، می‌توان به این جمع‌بندی رسید که الگوریتم ژنتیک برتری کاملی هم بر روشهای رایج سنتی نظیر DP و DPR^۱ و روشهای شبیه‌سازی همچون SOP^۲ دارد و هم نسبت به روشهای کاوشی جدید نظیر الگوریتم مورچه عملکرد بهتری نشان می‌دهد. از طرفی، الگوریتم مورچه نیز اگرچه در مسائل بزرگ دارای نقاط ضعفی است؛ لکن در مسائل کوچک قادر است به جوابی برابر با DP دست یابد. یکی از مشکلات عمده روش مورچه صرف زمان زیاد برای یافتن جواب نهایی است. و این نکته‌ای است که عملاً در گزارشهای پیشنهاد دهندگان روش، پوشیده مانده است. با توجه به اینکه روش مورچه از روشهای بسیار جدید است و تحقیقات برای بهبود روش ادامه دارد انتظار می‌رود در آینده، روشهای اصلاحی بتوانند به بخشی از مشکلات و ضعفهای این روش فایده‌بخش باشند. همچنین، لازم به ذکر است که عملکرد الگوریتم مورچه در مسائل ترکیبی به مراتب بهتر است.

بررسی بیشتر نشان داد که جوابهای الگوریتم مورچه در حدود جوابهای به دست آمده از کدگذاری دو دویی و خاکستری در الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در جدول ۱۰ نتایج الگوریتم مورچه با روشهای مختلف کدگذاری الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. اگرچه الگوریتم مورچه به نتایجی بهتر از روش دو دویی و خاکستری در الگوریتم ژنتیک دست یافته است اما نتوانسته به جوابی قابل مقایسه با روش کدگذاری حقیقی برسد. علاوه بر آن اگر زمان اجرای الگوریتم‌ها در نظر گرفته شود، مشاهده می‌گردد زمان اجرای الگوریتم مورچه حدود ۲۱ برابر روش حقیقی و حدود ۷ برابر کدگذاری دو دویی است. لذا مشخص می‌گردد که در مسئله حل شده در اینجا، الگوریتم مورچه با الگوریتم ژنتیک قابل مقایسه نیست و الگوریتم ژنتیک از نظر کارایی و زمان اجرا، بر الگوریتم مورچه برتری دارد. لازم به تاکید است که روشهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک غالباً از نوع ساده بوده و از روشهای ویژه‌ای که برای بهبود حل مسئله می‌توان در این روش به کار گرفت، استفاده نشده است [۱۰]. از طرف دیگر سعی گردیده در الگوریتم مورچگان از آخرین روشهای تحقیقاتی در باره این موضوع، استفاده شود. مقادیر پارامترهای مختلف به کار گرفته شده در الگوریتم ژنتیک در جدول ۱۱ ارائه شده است. نتایج جدول ۱۰، با ۱۵ گسسته‌سازی و ۱۵ اجرا در الگوریتم مورچه و همان طور که در جدول ۱۱ اشاره شده است با ۱۰ اجرا در الگوریتم ژنتیک به دست آمده است.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج روشهای مختلف کدگذاری الگوریتم ژنتیک با الگوریتم مورچه

روش	تابع هدف	زمان اجرا (ثانیه)
کدگذاری دو دویی الگوریتم ژنتیک	۲۲۱/۵۱	۱۵۲۳
کدگذاری خاکستری الگوریتم ژنتیک	۲۲۱/۸۵	۲۲۱۹
کدگذاری حقیقی الگوریتم ژنتیک	۱۰۸/۱۱	۵۳۸
سیستم کلونی مورچگان الگوریتم مورچه	۱۷۲/۱۰	۱۱۳۹۱

جدول ۱۱- مقادیر پارامترهای مختلف الگوریتم ژنتیک

تعداد اجرا	۱۰
تعداد سعی	۱۰۰۰۰
تعداد جمعیت	۵۰
طول هر ژن (در روش دو دویی)	۵
احتمال ترکیب (Pc)	۰/۷۵
احتمال جهش (Pm)	۰/۰۰۱

¹ Dynamic Programming and Regression

² Standard Operation Policy

- 1- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. (1996). "The Ant system: optimization by a colony of cooperating agents." *IEEE Trans. Sys. Mancybern.*, 26 (1), 29-42.
- 2- Gen, M., and Cheng, R. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*, 1st Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 3- Esat, V., and Hall, M. J. (1994). "Water resources system optimisation using genetic algorithms." *Mydroinformatics*, 94, 225-231.
- 4- Oliveria, R., and Loucks, D. P. (1997). "Operating rules for multireservoir systems." *Water Resource Res.*, 33(4), 839-852.
- 5- Wardlaw, R., and Sharif, M. (1999). "Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation." *J. of Water Res. Plan. and Manag., ASCE*, 125(1), 25-33.
- 6- Sharif, M., and Wardlaw, R. (2000). "Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: case study." *J. of Computing in Civil Engineering*, 14(4), 255-263.
- 7- Chen, L. (2003). "Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation." *J. of AWRA*, 39(5), 1157-1165.
- ۸- ممتحن، ش.، و برهانی داریان، ع. (۱۳۸۴) "کاربرد مقایسه‌ای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی." *مجله آب و فاضلاب*، ۵۶، ۱۱-۲۰.
- 9- Momtahn, Sh., and Dariane, A. B. (2007). "Direct search approach using genetic algorithm for optimization of water reservoir operating policies." *ASCE, J. of Water Res. Plan. and Manag.*, 113(3), 202-209.
- 10- Dariane, A. B., and Momtahn, Sh. (2006). "Direct search method using genetic algorithms for optimization of multi-reservoir systems operation." *J. of Water Res. Plan. and Manag., (in press)*.
- 11- Abbaspour, K., Schulin, R., and Van Genuchten, M. Th. (2001). "Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization." *Advances in Water Resources*, 24 (8), 827-841.
- 12- Maier, H., Simpson, A. R., Cozecchin, A., Foong, W., Phang, K., Seah, H., and Tan, C. (2003). "Ant colony optimization for design of water distribution systems." *J. of Water Res. Plan. and Manag., ASCE*, 129(3), 200-209.
- 13- Jalali, M. R., Afshar, A., and Marino, M. A. (2006). "Reservoir operation by ant colony optimization algorithms." *Iranian J. of Science and Technology, (IJST)*, (in press).
- ۱۴- مرتضوی نائینی، س. م.، و دهقانی، ا. ا. (۱۳۸۴). "بهینه‌سازی هوشمند مقاطع سدهای وزنی بتنی روی پی‌های سنگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان." *پنجمین کنفرانس هیدرولیک، کرمان*.
- ۱۵- مرتضوی نائینی، س. م.، و برهانی داریان، ع. (۱۳۸۵). "بررسی مقایسه‌ای روشهای الگوریتم مورچگان و ژنتیک در کالیبراسیون مدل تانک." *هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران*.
- ۱۶- افتخار جوادی، ا. (۱۳۸۲). "نقش پیش‌بینی جریان ورودی در بهره‌برداری بهینه از مخازن." *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران*.
- ۱۷- مرتضوی نائینی، س. م. (۱۳۸۴). "کاربرد روشهای جدید استوکاستیک-کاوشی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب." *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، تهران*.
- 18- Dorigo, M., and Gambardella, L. M. (1997). "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem." *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, 1(1), 53-66.