

ارزیابی الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و سیستم مورچگان پیوسته در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن

محمدجواد زینلی^{۱*}، ام‌البنی محمدرضاپور^۲، فرید فروغی^۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۰۹

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده آب‌و خاک، دانشگاه زابل

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب‌و خاک، دانشگاه زابل

^۳ عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: mj.zeynali@gmail.com

چکیده

یکی از مسائل مهم بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب، مسأله بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها است. در خصوص مسائل بهینه‌سازی روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شده که با توجه به عدم توانایی روش‌های بهینه‌سازی معمول، در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی، به‌کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک و سیستم مورچگان پیوسته جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد درودزن استفاده شد. افزون بر این، تأثیر اعمال قیود زنجیره‌ای در بدنه این الگوریتم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای تمامی برنامه‌ها منجر به جواب‌های شدنی گردیده ولی بدون در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای در مواردی الگوریتم قادر به یافتن جواب شدنی نبوده است. لذا اعمال این قیود در بدنه این الگوریتم‌ها کارآیی آن‌ها را به مراتب بالا برد. همچنین الگوریتم ژنتیک در یافتن جواب بهینه شدنی عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است. جهت تحلیل عملکرد الگوریتم‌ها از معیار اعتمادپذیری استفاده شده است و با توجه به این معیار که یکی از مهم‌ترین معیارها در تعیین عملکرد سیستم‌ها است، الگوریتم ژنتیک با اعتمادپذیری معادل ۰/۹۶۴، مناسب‌ترین عملکرد را داشته است.

واژه‌های کلیدی: اعتمادپذیری، الگوریتم‌های فرا ابتکاری، بهینه‌سازی، سد درودزن، قیود زنجیره‌ای

Evaluation of Particle Swarm, Genetic and Continuous Ant Colony Algorithms In Optimal Operation of Doroodzan Dam Reservoir

MJ Zeynali^{1*}, O Mohammad Reza Pour², F Frooghi³

Received: 3 March 2014 Accepted: 31 August 2014

¹- MSc Student, Water Resources Engin. Dept., Water and Soil, Univ. of Zabol, Iran

²- Assis Prof., Water Resources Engin. Dept., Water and Soil, Univ. of Zabol, Iran.

³-Scientific Staff Member of Shiraz University, Darab College of Agriculture and Natural Resources

*Corresponding Author, Email: mj.zeynali1@gmail.com

Abstract

One of the most important problems in water resources management is the optimal operation of dam reservoirs. Various methods have been applied to deal with optimization problems. Noting the inability of the conventional optimization methods to solve complex optimization problems, the Meta-Heuristic algorithms have been noticed more than ever. In this study, particle swarm, genetic and continuous ant colony system algorithms were used to optimize the operation of the Doroodzan reservoir. Furthermore, the effect of chain constraints inclusion on the framework of these algorithms were analyzed. The results indicated that regarding the chain constraints, all programs resulted in feasible solutions, where without chain constraints, in some cases the algorithm was unable to find a feasible solution. Therefore, applying these constraints in the framework of the algorithms improved their performances further. In finding the optimized solution, the Genetic algorithm had a better performance than the two other algorithms. Reliability criterion was used to evaluate the algorithms performances. Based on this criterion, as one of the most important criteria in determining system performance, the Genetic algorithm with the Reliability value of 0.964 had the most suitable performance.

Keywords: Chain constraints, Doroodzan dam, Meta-Heuristic algorithms, Optimization, Reliability

مقدمه

بهینه‌سازی مانند مسأله بهره‌برداری از مخزن سد، با افزایش ابعاد، تعداد متغیرها و تعداد قیدها، امکان حل این‌گونه مسائل با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی و با روش‌های صریح محاسباتی موجود کاهش یافته و رسیدن به جواب بهینه مطلق در این شرایط بسیار مشکل است. به این ترتیب، استفاده از روش‌های کاوشی یا الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی قدرتمند جهت بهینه‌سازی سیستم‌های تک مخزنه و چند مخزنه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم

امروزه با توجه به رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضا، نیاز به آب، افزایش یافته است و احداث مخازن جهت تأمین نیاز آبی، یک امر اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر به‌علت مغایرت در رژیم آبدی رودخانه‌ها با نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی، احداث سیستم‌های ذخیره‌ای جهت تنظیم جریان‌ات طبیعی رودخانه‌ها و تأمین نیازهای آبی، یکی از بهترین شیوه‌های استفاده از منابع آب است. در مسائل پیچیده

مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد سفیدرود مورد استفاده قرار دادند. این تحقیق با دو هدف، تأمین نیاز پایین‌دست و دیگری تخلیه رسوبات مورد بررسی قرار گرفته است. نژاد نادری و همکاران (۱۳۹۰) از الگوریتم‌های PSO، مورچگان و ژنتیک جهت ارائه سیاست بهینه بهره‌برداری سد کلان ملایر استفاده نمودند. در این تحقیق تابع هدف کمینه‌سازی مجموع اختلافات خروجی مخزن و نیاز آبی پایین‌دست، در هر دوره بوده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد که اعمال الگوریتم جامعه مورچگان در فرایند کمینه کردن تابع هدف باعث بهبود چشمگیر مقدار تابع هدف شده است. آنزافزا و همکاران (۱۳۹۱)، در تحقیقی به بررسی مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد شهرچای و با هدف تأمین نیاز پایین‌دست از جمله نیاز شرب، کشاورزی و محیط‌زیست پرداختند. در این مطالعه به‌منظور تعیین میزان وابستگی رهاسازی به عوامل مختلف از جمله حجم ذخیره و دبی رودخانه، روابط بین متغیرها به‌صورت یک رابطه غیرخطی درجه‌دو در نظر گرفته‌شد. این مطالعه مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های آنیلینگ، ژنتیک و PSO انجام گرفته که برای هر کدام از الگوریتم‌ها از طریق ۱۰ مرتبه اجرای برنامه (به‌دلیل وجود متغیرهای تصادفی در هر یک از الگوریتم‌ها) پارامترهای بهینه به‌دست آمد و مقایسه نتایج منتهی به تعیین بهترین روش برای حل مسئله گردید که الگوریتم بهینه‌سازی PSO به‌صورت مؤثرتری نسبت به سایر روش‌ها عمل نمود.

کومار و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی جهت بهینه‌سازی عملکرد مخزن سد تک منظوره مالابراه^۴ برای آبیاری گیاهان زراعی از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. نتایج نشان داد عملکرد بهینه به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک شبیه عملکرد بهینه به‌دست‌آمده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی می‌باشد. ردی و کومار (۲۰۰۷) برای حل مسئله چند معیاره

ازدحام ذرات^۱ (PSO) یکی از این الگوریتم‌ها است که اولین بار توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵) مطرح شد. الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) نیز یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی است که توسط هالند و همکاران (۱۹۷۵) ارائه شده است. سیستم مورچگان پیوسته^۳ (ACOR) نیز اولین بار توسط سوشا و دوریگو ارائه شد که برخلاف دیگر الگوریتم‌های مورچگان فضای جست‌وجو را پیوسته در نظر می‌گیرد (سوشا و دوریگو ۲۰۰۸).

برهانی داریان و نایینی (۱۳۸۷) الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچگان را در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن آب مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم مورچگان با برنامه‌ریزی پویا در یافتن جواب بهینه و منحنی‌های فرمان کارآیی بهتری دارد. برهانی داریان و شهیدی (۱۳۸۷) کارآیی روش‌های شبیه‌سازی آنیلینگ، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچگان را در مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز، مورد بررسی قرار دادند. روش فروشنده دوره‌گرد و برنامه‌ریزی پویا نیز به‌عنوان یک روش حل و معیاری برای سنجش سه روش دیگر به‌کار گرفته شد. مقایسه روش‌ها نشان داد که الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ روش قدرتمندی نسبت به سایر روش‌ها است و در زمان کم‌تری به نتایج بهتری می‌رسد. جهان‌پور و صادقیان (۱۳۸۸) کاربرد الگوریتم ژنتیک ترکیبی را در تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کلان ملایر در شرایط خشک‌سالی هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار دادند. معیار تعیین سطح عملکرد الگوریتم، کمینه کردن مجموع اختلاف خروجی مخزن و نیاز آبی پایین‌دست در هر دوره بوده است. نتیجه بهینه‌سازی انجام‌گرفته، رسیدن به ضرایب بهینه برداشت از حجم مخزن در هر دوره و سیاست بهره‌برداری بهینه از این سد بوده است. آزادانیا و زهرایی (۱۳۸۹) در تحقیقی الگوریتم PSO را برای حل

^۱ Particle swarm optimization

^۲ Genetic algorithm

^۳ Continuous ant system

^۴Malaprabha

مشابهی از منحنی‌های فرمان را در مقایسه با منحنی فرمان تولیدشده به وسیله الگوریتم GA ارائه داده است. در این تحقیق بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری از قبیل الگوریتم سیستم مورچگان پیوسته (ACOR)، الگوریتم ازدحام نرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA)، به منظور رهاسازی بهینه برای تأمین نیاز کشاورزی پایین‌دست در یک دوره ۹۹ ماهه از سال ۱۳۸۲ مورد بررسی قرار گرفته است. به بیان دیگر، هدف از این تحقیق تعیین میزان بهینه رهاسازی از سد در ماه‌های مختلف در دوره مورد نظر است به شکلی که نیاز کشاورزی در پایین‌دست به بهترین شکل در کل دوره تأمین شود. تعیین میزان کارایی سه الگوریتم ACOR، PSO و GA و مقایسه آن‌ها باهم و همچنین تأثیر اعمال قیود زنجیره‌ای در بدنه الگوریتم‌ها نیز جزء اهداف تحقیق است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه سد درودزن، جزئی از حوضه فرعی طشک، بختگان، مهارلو بوده و مساحت آن حدود ۴۵۶۵ کیلومتر مربع بین طول‌های $40^{\circ} 50'$ تا $52^{\circ} 55'$ شرقی و عرض‌های $05^{\circ} 25'$ تا $07^{\circ} 30'$ شمالی واقع شده است. سد مخزنی درودزن بر روی رودخانه کر احداث گردیده است. رودخانه کر از جمله رودخانه‌های پر آب استان فارس است که از شمال غربی استان فارس و از بلندی‌های سلسله جبال زاگرس جریان پیدا می‌کند. طول رودخانه کر از سراب تا محل سد درودزن ۱۸۵ کیلومتر و تا دریاچه بختگان ۳۵۱/۵ کیلومتر است. در نهایت آب رودخانه به دریاچه بختگان می‌ریزد. هدف از احداث این سد، تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و صنعت، تأمین بخشی از آب شرب شهر شیراز و شهرهای بین راه و نیز تولید برق بوده است (جداری عیوضی ۱۳۸۹). شکل

بهره‌برداری از مخزن الگوریتم PSO چندهدفه را پیشنهاد نمودند. کومار و ردی (۲۰۰۷) روش‌های GA، PSO و EMP^۱ را برای تعیین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره بهادرا^۲ واقع در هند به کار بردند. نتایج نشان داد که EMP^۱ نسبت به GA و PSO نتایج بهتری در تعیین سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن دارد. لئو (۲۰۰۹) با استفاده از ترکیب عملگرهای مختلف به کاررفته در الگوریتم ژنتیک نامطلوب (مرتب کردن جواب‌های غیر پست^۳، مرتب کردن بر اساس فاصله ازدحام و توجه به جواب‌های مناسب‌تر) و همچنین یک عملگر جهش در الگوریتم PSO، یک مدل بارش-رواناب را بهینه‌سازی نمود که تابع هدف مورد استفاده در این مدل، کمینه کردن مجموع مربعات اختلاف دبی پیک مشاهداتی و دبی‌های پیک شبیه‌سازی شده است. داریان و مرادی (۲۰۰۹) از الگوریتم ACOR در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن حوضه کرخه استفاده نموده و نتایج آن با الگوریتم GA مقایسه شد که نتایج حاصل از مدل کوتاه مدت نشان‌دهنده برتری الگوریتم مورچه پیوسته نسبت به GA بود. افشار (۲۰۱۰) از الگوریتم ACOR برای طراحی شبکه‌های فاضلاب استفاده نمود. کانگ رانگ و لاکهام (۲۰۱۳) در تحقیقی از مدلی شامل روش بهینه‌سازی جامعه مورچگان شرطی و مدل شبیه‌سازی مخزن، جهت بررسی منحنی فرمان ماهانه مخزن لامپائو^۴ واقع در شمال شرقی تایلند استفاده نمودند و برای ارزیابی مدل ارائه شده خود از ۴۰۰ داده جریان تولیدی مخزن استفاده کرده و نتایج با روش الگوریتم GA و نحوه بهره‌برداری فعلی مقایسه نمودند و نتایج نشان داد که منحنی فرمان^۵ تولیدشده به وسیله روش بهینه‌سازی جامعه مورچگان شرطی و روش شبیه‌سازی، الگوی

¹Enhanced mimetic particle swarm optimization

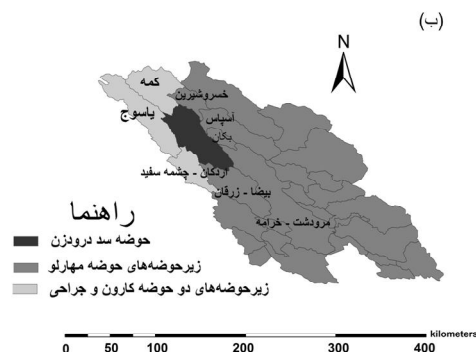
²Bhadra

³Non-dominated solution

⁴Lampao

⁵Role curve

برای مسأله موردنظر تعریف کرد. در مسأله بهره‌برداری از مخزن سد، متغیر تصمیم ممکن است حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی، S_t ، یا میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی، R_t ، باشد (معینی و افشار ۱۳۸۷ الف).



۱ موقعیت حوضه سد درودزن را در استان فارس نشان می‌دهد.

تابع هدف و قیود

برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در حل یک مسأله خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را



شکل ۱ - موقعیت حوضه مهارلو در استان فارس (الف)، حوضه سد درودزن و زیر حوضه‌های اطراف آن (ب).

در رابطه ۲ S_t حجم مخزن در ابتدای دوره t و S_{t+1} حجم مخزن در انتهای دوره t است؛ ΔS_t نیز تغییرات حجم مخزن در طول دوره t است. از طرفی میزان رهاسازی از هر یک از مخازن در هر دوره نباید از حدودی کمتر یا بیشتر باشد به عبارت دیگر همان‌طور که در معادله ۳ مشخص است، باید رهاسازی در هر بازه (R_t) باید بین میزان رهاسازی کمینه (R_{\min}) و میزان رهاسازی بیشینه (R_{\max}) باشد و از طرفی میزان حجم مخازن در هر دوره (S_t) نیز مطابق با رابطه ۴ باید بین حجم کمینه (S_{\min}) و حجم بیشینه مخزن (S_{\max}) باشد.

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad [۳]$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad [۴]$$

روش‌های متفاوتی برای برخورد با قیود مسأله وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به راهکار حذف، بهبود و اصلاح، اصلاح عملگرها و اعمال جریمه اشاره نمود که هر یک از این راهکارها رویه خاص خود را دنبال می‌نمایند. همان‌طور که اشاره شد یکی از

در این تحقیق برای حل مسأله بهره‌برداری سد درودزن، میزان رهاسازی از این مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است و پس از تأمین صددرصدی نیازهای شرب و صنعت، تابع هدف کمینه‌سازی میزان اختلاف تقاضا (نیاز کشاورزی پایین‌دست) و رهاسازی است که مطابق با رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$O.F, minimize = \sum_{t=1}^n \left(\frac{d_t - R_t}{d_{\max}} \right)^2 \quad [۱]$$

R_t مقدار آب رهاسازی شده در دوره زمانی t ام، d_{\max} بیشینه میزان تقاضا در طول دوره می‌باشد و d_t مقدار تقاضا در دوره زمانی t ام می‌باشد.

در مسائل بهینه‌سازی، قیدها یکی از ارکان اصلی هستند که در این مسائل، محدوده جواب‌های شدنی را تعریف می‌کند. قیود مربوط به بیلان آب در مخزن که مهم‌ترین آن‌ها رابطه پیوستگی است و بر اساس معادله ۲ استوار است:

$$S_t + \Delta S_t = S_{t+1} \quad [۲]$$

روش‌های معمول در حل مسائل مقید، منظور کردن ضریب جریمه^۱ برای تابع هدف است. اعمال ضریب جریمه نیز به شیوه‌های مختلفی امکان‌پذیر است مانند جمع‌کردن، ضرب کردن و یا ترکیبی از این دو، که روش به‌کاررفته در این تحقیق، روش ضرب میزان جریمه، در تابع هدف است. در این صورت مطابق با رابطه ۵ برای تابع هدف خواهیم داشت:

$$F = \begin{cases} F & \text{if solution is feasible} \\ (F \times (1 + (C \times V))) & \text{otherwise} \end{cases} \quad [5]$$

C ضریب جریمه است که مقادیر مثبت به خود می‌گیرد. V میزان تخطی از قیود است که مجموع تخطی از حجم کمینه و بیشینه در طول دوره است.

¹Penalty coefficient

الگوریتم ژنتیک

حرکت به‌سوی بهترین موقعیتی که اختیار کرده است. ۳- حرکت به‌سوی بهترین موقعیتی که کل گروه (کل ذرات) پیدا کرده‌اند. لذا تغییر موقعیت هر ذره در فضای جست‌وجو تحت تأثیر تجربه خود و دیگر ذرات خواهد بود (شی و ابره‌ارت ۱۹۹۸).

در یک مسأله خاص، هر ذره از گروه می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان‌پذیر است. هر ذره، اطلاعاتی شامل بهترین مقدار (موقعیتی) که تاکنون به‌دست آورده است (بهینه شخصی^۱): موقعیتی که در حال حاضر در آن قرار دارد $(X_i, (t))$ و بهترین جوابی که تاکنون در کل گروه به‌دست آمده است (بهینه فراگیر^۲) را دارا است. هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب موقعیت خود را با استفاده از موقعیت کنونی $(X_i, (t))$ ، سرعت کنونی $(V_i, (t))$ ، فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه شخصی و فاصله بین موقعیت کنونی و بهینه فراگیر تغییر می‌دهد. لذا بردار سرعت جدید $V_i, (t+1)$ برای ذره نام طبق رابطه ۶ محاسبه می‌شود (شی و ابره‌ارت ۱۹۹۸):

$$V_i(t+1) = w \cdot V_i(t) + C_1 r_1 (P_i(t) - X_i(t)) + C_2 r_2 (G(t) - X_i(t)) \quad [6]$$

که در آن r_1 و r_2 بردارهای تصادفی بین صفر و یک هستند که برای حفظ تنوع و گوناگونی گروه به‌کار می‌روند. C_1 و C_2 پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند؛ انتخاب مقدار مناسب برای این پارامترها منجر به تسریع همگرایی الگوریتم و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلی می‌شود. انتخاب مقادیر بزرگ‌تری برای پارامتر شناختی C_1 نسبت به پارامتر اجتماعی C_2 مناسب‌تر است، اما بایستی همواره شرط $C_1 + C_2 \leq 4$ رعایت شود

در الگوریتم ژنتیک، ابتدا به‌طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برانزندی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه به‌وسیله عملگرهای پیوند و جهش جامعه‌ای جدید با مقادیر برانزندی بالاتر تولید می‌شود (گلدبرگ ۱۹۸۹). مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم GA شامل تلاقی^۱ و جهش^۲ است که عمل تلاقی بر روی کروموزوم‌های افرادی که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود و پس از اعمال برش ژن‌های دو والد از محل برش از هم جدا شده و باهم جابه‌جا می‌شوند. تلاقی می‌تواند در یک نقطه از طول کروموزوم (تلاقی تک نقطه‌ای^۳) یا از دو نقطه (تلاقی دو نقطه‌ای^۴) یا چند نقطه (تلاقی چندنقطه‌ای^۵) صورت گیرد. عمل جهش نیز به‌صورت‌های گوناگونی می‌تواند اعمال شود از جمله این‌که یک ژن می‌تواند با ژنی دیگر در طول کروموزوم تعویض شود یا مقدار عددی یک یا چند ژن به‌طور تصادفی تغییر کند. عمل تشکیل کروموزوم نیز به طرق مختلف امکان‌پذیر است که می‌توان داده‌ها را به‌صورت دودویی کدگذاری کرد و سپس داده‌های کدگذاری شده را کنار هم قرار داد (یا خود داده‌های واقعی را کنار هم قرار داده) که این کار سبب عدم افزایش بیش‌ازحد طول رشته می‌گردد (اکبرپور و موسوی ۱۳۸۵).

الگوریتم ازدحام ذرات

در این الگوریتم، موقعیت هر ذره یک نقطه از فضای جواب مسأله را نشان می‌دهد. هر ذره دارای حافظه است و بهترین موقعیتی که در فضای جست‌وجو به آن می‌رسد را به خاطر می‌سپارد. حرکت هر ذره می‌تواند در سه جهت صورت گیرد: ۱- ادامه حرکت خود، هم‌جهت با مسیری که طی می‌نموده است. ۲-

¹Crossover²Mutation³Single Crossover⁴Double Crossover⁵Multi Crossover⁶Personal Best⁷Global Best

آن‌ها مرتب‌شده و ذخیره می‌گردند. سپس برای هر راه-حل، S_l ، یک وزن، ω ، تعیین می‌شود که مقدار آن مرتبط با کیفیت جواب مربوطه است. مقدار این وزن برای امین راه‌حل، از رابطه ۸ محاسبه می‌شود (سوشا و دوریگو ۲۰۰۸).

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

که در این رابطه، مقدار پارامتر q بایستی تنظیم شود. به‌طور مثال در راه‌حل S_l برای S_l^i چنانچه مقدار q خیلی کوچک باشد، شانس انتخاب راه‌حلهایی که در مجاورت S_l^i قرار دارند کمتر خواهد داشت و احتمال انتخاب خود S_l^i بالا می‌رود (سوشا و دوریگو ۲۰۰۸).

حال برای تولید جواب جدید بر اساس جواب S_l یک عدد تصادفی نرمال به‌روش باکس مولر، برای متغیر تصمیم λ تولید می‌شود (باکس و مولر ۱۹۵۸). مقدار عدد تولید شده جدید بر اساس متغیر λ خواهد بود. این کار برای همه n متغیر تکرار می‌شود تا یک جواب برای کلیه متغیرهای تصمیم تولید گردد. جواب تولیدشده حاصل انتخاب یکی از مورچه‌ها است. با تکرار این مرحله برای هر مورچه، سرانجام به تعداد مورچه‌ها، جواب جدید تولید و به آرشیو اضافه می‌شود. در ادامه، پس از مرتب‌سازی کل جواب‌ها، k جواب برتر ذخیره و مابقی پاک می‌شود (برهانی داریان و مرادی ۱۳۸۹).

الگوریتم‌هایی که در این تحقیق موردبررسی قرار گرفته‌اند همگی در نرم‌افزار MATLAB (نسخه ۲۰۱۱) کد نویسی و اجرا شده‌اند.

قیود زنجیره‌ای

(گلدبرگ ۱۹۸۹). پارامتر W اینرسی وزنی نام دارد که برای تضمین همگرایی در دسته ذرات به‌کار می‌رود؛ و مقداری بین $0/4$ و $0/7$ برای آن مناسب است (گلدبرگ ۱۹۸۹). $P_{i,t}(t)$ موقعیت بهترین محلی که ذره i تاکنون داشته و $G_{i,t}(t)$ موقعیت بهترین محلی که کل ذرات تاکنون آنجا را یافته‌اند. موقعیت جدید ذره i نام نیز از رابطه ۷ به‌دست خواهد آمد (شی و ابرهارت ۱۹۹۸):

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t+1} \quad [V]$$

الگوریتم مورچگان پیوسته

در الگوریتم ACOR متغیرهای تصمیم به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و الگوریتم قادر خواهد بود که بر روی فضای R از اعداد حقیقی مقادیری را انتخاب نماید. در این الگوریتم، پیوسته‌سازی فضا برای متغیرهای تصمیم با استفاده از یک تابع چگالی احتمال (یک تابع گوسی کرنل) انجام می‌پذیرد.

الگوریتم ACOR از یک آرشیو برای ذخیره مجموعه جواب‌ها استفاده می‌شود. به‌همین منظور، در سیستمی با n متغیر تصمیم تعداد k تابع گوسی منفرد برای هر متغیر تصمیم در آرشیو در نظر گرفته می‌شود که با انتخاب هر یک از آن‌ها و تولید جواب جدید، درواقع وضعیتی معادل با یک تابع گوسی کرنل برای هر متغیر به‌وجود می‌آید. و به‌این‌ترتیب در آرشیو، n تابع گوسی کرنل خواهیم داشت. تعداد راه‌حل‌های ذخیره‌شده در آرشیو برابر k است و l امین راه‌حل ذخیره‌شده در آرشیو با S_l^i مشخص شده است متغیرهای تصمیم مربوط به l امین جواب، با S_l^1 و S_l^2 و به‌همین ترتیب تا متغیر تصمیم n ام با S_l^n نشان داده شده است (تشکیل یک مجموعه جواب را داده‌اند). مجموعه جواب هر راه‌حل وارد تابع هدف شده و سپس مقدار آن برای هر راه‌حل، $f(S_l^i)$ ، محاسبه می‌شود. آنگاه جواب‌های موجود در آرشیو بر اساس کیفیت

تخطی کم‌تر یا جواب شدنی گردد اما الزاماً منتج به جواب شدنی^۱ نمی‌گردد. با این حال در زمان در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای استفاده از ضریب جریمه نیز الزامی است، زیرا امکان وجود راه‌حل‌های مناسب اما نشدنی^۲ در طی تکرارهای مختلف وجود دارد که بایستی در مراحل بعد این‌چنین راه‌حل‌هایی انتخاب نشود.

با توجه به این مطلب، در الگوریتم GA که ژن‌ها تشکیل‌دهنده رشته کروموزومی هستند؛ مقدار هر ژن از رشته کروموزومی به مقدار ژن ماقبل خود بستگی دارد. در الگوریتم سیستم ACOR نیز برای تکمیل مسیر توسط مورچه‌ها، انتخاب هر گره (مقدار رهاسازی) به گره انتخاب‌شده قبلی بستگی دارد و به همین صورت در الگوریتم PSO در تعیین موقعیت اولیه هر ذره نیز مقدار عددی هر بعد به مقدار بعد ماقبل آن بستگی دارد و به این ترتیب این قیود در بدنه الگوریتم‌ها اعمال شده است.

بررسی کارآیی سیاست بهره‌برداری از مخزن ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری، آخرین و مهم‌ترین گام از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی جهت بهره‌برداری از مخازن است. عملکرد سیستم‌های منابع آب اغلب توسط معیارهای ساده‌ای از قبیل میانگین و واریانس و یا متغیرهای بهره‌برداری، اعتمادپذیری و اطمینان‌پذیری سنجیده می‌شوند که استفاده از شاخص‌ها و معیارهای ارزیابی تا حد زیادی در شناخت بهتر عملکردها مؤثر است. از رایج‌ترین شاخص‌ها در این خصوص، شاخص اعتمادپذیری^۳ است فراوانی نسبی عدم شکست را اعتمادپذیری می‌نامند. اعتمادپذیری کمی (درصد تأمین نیاز، α_0)، به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود (کلسن و راسبرگ ۲۰۰۴):

استفاده از قیود زنجیره‌ای در الگوریتم جامعه مورچگان و برای اولین بار در حل مسأله فروشنده دوره‌گرد و با ایجاد یک لیست ممنوعه برای هر شهر به‌کار گرفته شد (معینی و افشار ۱۳۸۷ ب). مسائل مقید سریالی مسائلی هستند که تصمیم در هر مرحله (متغیر تصمیم) به تصمیمات گرفته‌شده در مراحل قبل (متغیرهای تصمیم قبلی) وابسته است. در مسائل بهره‌برداری مخزن اصلی‌ترین قید مسأله، معادله پیوستگی است؛ که ماهیت این قید، یک قید سریالی است. این بدان معناست که متغیر حجم مخزن در هر گام زمانی به میزان متغیر حجم مخزن در گام زمانی قبل وابسته است و با مشخص بودن مقادیر و محدوده قیود متغیرها در گام زمانی قبل، می‌توان مقادیر و محدوده متغیرها در گام زمانی بعد را محاسبه نمود (معینی و افشار ۱۳۸۷ ب).

در روش‌های معمول برای به‌کارگیری الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی، معمولاً رهاسازی‌های اولیه به صورت تصادفی و بین دو عدد رهاسازی کمینه و رهاسازی بیشینه انتخاب می‌شوند. پس از آن، با توجه به رهاسازی به دست آمده قیود مورد بررسی قرار می‌گیرند و اگر تخطی‌ای از قیود صورت گرفته باشد مقدار آن تخطی به تابع هدف اضافه می‌شود اما با به‌کارگیری قیود زنجیره‌ای، همزمان با تعیین مقدار رهاسازی قیود نیز ارضاء می‌گردند.

در مسأله بهره‌برداری از مخزن سد، بایستی این مطلب را در نظر داشت که در هیچ‌کدام از قسمت‌های دوره در نظر گرفته‌شده نباید مقادیر به دست آمده برای رهاسازی و حجم ماهانه مخزن، از حدود در نظر گرفته‌شده تخطی داشته باشد زیرا وجود حتی یک تخطی از قیود در طول دوره به منزله شکست در حل مسأله بهره‌برداری است. از طرفی به‌کارگیری ضریب جریمه برای جواب‌هایی که با تخطی همراه هستند می‌تواند در هر مرحله باعث رسیدن به جواب‌هایی با

¹ Feasible

² Infeasible

³ Reliability

نتایج و بحث

در الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای (GACC) پارامترهای زیادی بر مقدار تابع هدف تأثیرگذار هستند که پارامترهای مناسب آن در جدول ۱ آورده شده است. جهت جلوگیری از طول شدن طول کروموزوم، ساختار کروموزوم به صورتی تعریف شده که خود اعداد تشکیل دهنده بیت‌ها یا ژن‌ها خواهند بود (کدگذاری ارزشی).

$$\alpha_Q = \frac{\sum_{t=1}^T R_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad [9]$$

در این رابطه افق برنامه‌ریزی شامل T گام زمانی است. D_t مقدار نیاز (میلیون مترمکعب) در گام زمانی t و R_t مقدار آب تخصیص داده شده (میلیون مترمکعب) در گام زمانی t است.

جدول ۱ - پارامترها و روش‌های به کار برده شده در الگوریتم GACC.

۱۰۰	تعداد جمعیت
۸۰	تعداد والدین
۰/۳	احتمال جهش
۰/۱	احتمال انتخاب برش تک نقطه‌ای
۰/۲	احتمال انتخاب برش دو نقطه‌ای
۰/۷	احتمال انتخاب برش چندنقطه‌ای
کدگذاری ارزشی	نوع کدگذاری
انتخاب با چرخ رولت	نوع انتخاب والدین و انتخاب برش

تحلیل حساسیت مناسب‌ترین مقدار برای هر پارامتر مشخص خواهد شد. جدول ۲ نیز مقادیر پارامترهای سیستم مورچگان پیوسته با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای (ACORCC) را نشان می‌دهد:

پارامترهای زیادی برای الگوریتم‌ها تعریف شده است که تغییر هر کدام از این پارامترها منجر به تغییر عملکرد الگوریتم‌ها می‌شود و در سرعت همگرایی و مرغوبیت جواب‌ها تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین با

جدول ۲ - مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ACORCC.

تعداد مورچه	ضریب جریمه C	ضریب ضریب	تعداد نمونه‌ها
ξ	q	ξ	
۵۰۰	۱۰	۰/۳	۲۰۰
		۱/۱	

C_1 و C_2 بهترین مقدار برای تابع هدف با $8/61$ به دست آمده که با نتایج گلدبرگ (۱۹۸۹) مطابقت دارد گذشته مطابقت دارد. پارامتر w نیز در هر تکرار تغییر کرده اما مقدار این پارامتر، همواره بین $0/4$ و $0/7$ است.

در الگوریتم ازدحام ذرات با در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای (PSOCC) پارامترهای C_1 و C_2 که پارامترهای شناختی و اجتماعی هستند و همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود مقادیر دو و یک به ترتیب برای

جدول ۳ - تأثیر مقادیر C_1 و C_2 در الگوریتم ازدحام ذرات در مقادیر تابع هدف.

۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	C_1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------

۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۲
۲۷/۲۰	۲۳/۱۱	۱۳/۹۳	۱۸/۱۹	۱۴/۴۰	۸/۶۱	۱۲/۴۹	۱۱/۶۸	۱۲/۰۱	مقدار تابع هدف

الگوریتم‌ها توانایی یافتن جوابی بدون تخطی از قیود را ندارند (الگوریتم GA و ACOR). همچنین در نظر نگرفتن قیود زنجیره‌ای نسبت به زمانی که این قیود مورد استفاده قرار می‌گیرند، منجر به جواب‌هایی با مقدار بالاتری برای تابع هدف شده است.

مقادیر تابع هدف برای الگوریتم‌های PSO، GA و ACOR در ده مرتبه اجرا در جدول ۴ و برای الگوریتم‌های PSOCC، GACC و ACORCC در ده مرتبه اجرا در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود زمانی که از قیود زنجیره‌ای در بدنه الگوریتم استفاده نمی‌شود در مواردی حتی

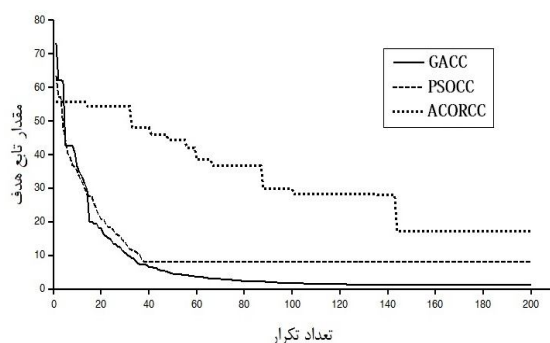
جدول ۴ - مقادیر تابع هدف برای الگوریتم‌های PSO، GA و ACOR

اجرا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
PSO	۱۱/۸۸	۲۱/۴۹	۱۶/۴۴	۲۶/۸۴	۲۰/۲۲	۱۸/۰۱	۲۵/۵۷	۲۲/۴۳	۱۷/۴۸	۲۳/۱۳
GA	۱۸/۸۲	*	*	۲۷/۹۹	۱۸/۶۷	۱۹/۱۸	*	۲۸/۱۹۷	۲۳/۷۰	*
ACOR	۲۷۰/۸۶	*	۳۳۸/۸۰	*	*	۲۵۴/۱۳	۳۰۰/۷۵	۳۳۳/۲۴	*	*

* مقدار بدون تخطی‌ای برای تابع هدف تولید نشد

جدول ۵ - مقادیر تابع هدف برای الگوریتم‌های PSOCC، GACC و ACORCC

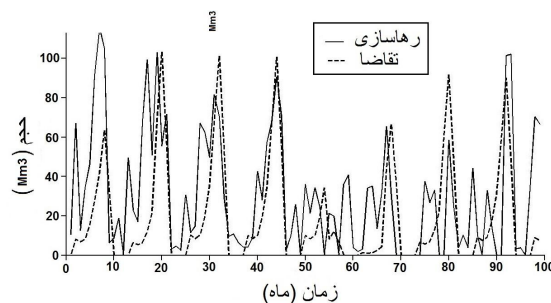
اجرا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
PSOCC	۹/۵۳	۱۲/۴۵	۸/۶۱	۱۰/۵۸	۱۴/۰۰	۱۵/۸۳	۱۰/۶۶	۸/۹۵	۱۲/۸۹	۸/۸۴
GACC	۱/۶۱	۱/۶۷	۱/۵۹	۱/۷۶	۱/۱۷	۱/۹۳	۱/۲۶	۱/۹۳	۱/۹۲	۲/۴۱
ACORCC	۲۵/۹۵	۲۳/۴۱	۱۸/۲۹	۲۲/۷۹	۲۳/۶۷	۱۷/۰۰	۲۰/۱۰	۱۹/۸۵	۲۲/۲۳	۱۹/۳۵



شکل ۲ - نحوه عملکرد الگوریتم‌های PSOCC، GACC و ACORCC

در شکل ۲ نحوه عملکرد الگوریتم‌های GACC، PSOCC و ACORCC برای یافتن مقدار تابع هدف در مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد پس از ۲۰۰ تکرار و همچنین میزان رهاسازی و تقاضای ماهانه برای الگوریتم GACC که عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است در شکل ۳ نشان داده شده است.

میانگین، بهترین و بدترین مقادیر به دست آمده برای تابع هدف، با توجه به قیود زنجیره‌ای و همچنین میزان اعتمادپذیری راه‌حل‌های تولیدی به وسیله الگوریتم‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳ - مقدار حجم آب رهاسازی شده بهینه خروجی الگوریتم GACC و تقاضای ماهانه.

جدول ۶ - اعتمادپذیری، میانگین، بهترین و بدترین مقدار تابع هدف الگوریتم‌های PSOCC، GACC و ACORCC.

الگوریتم	اعتمادپذیری	میانگین تابع هدف	بهترین تابع هدف	بدترین تابع هدف
GACC	۰/۹۶۴	۱/۷۲	۱/۱۷	۲/۴۱
PSOCC	۰/۹۵	۱۱/۲۴	۸/۶۱	۱۵/۸۳
ACORCC	۰/۷۸	۲۱/۲۶۳	۱۷/۰۰	۲۵/۹۵

کارایی سه الگوریتم ACOR، PSO و GA و همچنین تأثیر اعمال قیود زنجیره‌ای در بدنه الگوریتم‌ها و همچنین تعیین مناسب‌ترین مقادیر برای پارامترهای این الگوریتم‌ها بوده است. نتایج نشان داد که در مواردی که الگوریتم‌های GA و ACOR قادر به یافتن جواب بیش‌تر است و هم مجموع این دو پارامتر کم‌تر از چهار می‌باشد.

نتایج تحقیق معینی و افشار (۱۳۸۷) که مسأله بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز را با الگوریتم مورچگان نخبه مورد بررسی قرار داده بودند نیز نشان می‌دهد که الگوریتم مقید جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم نامقید (بدون در نظر گرفتن قیود زنجیره‌ای) یافته است و همچنین با به‌کارگیری قیود زنجیره‌ای در تمامی اجراهای برنامه، جواب‌های شدنی حاصل شده است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن در یک دوره ۹۹ ماه از سال ۱۳۸۲ مورد بررسی قرار گرفت که هدف تعیین میزان رهاسازی از سد در ماه‌های مختلف، تعیین میزان شدنی نبوده‌اند با اعمال قیود زنجیره‌ای این الگوریتم‌ها قادر به یافتن جواب شدنی بوده و به نحو مطلوبی کارایی آن‌ها بالا رفته است. با در نظر گرفتن این قیود، الگوریتم GACC و پس‌از آن الگوریتم‌های PSOCC و ACORCC عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌اند و همچنین از نظر شاخص اعتمادپذیری الگوریتم GACC عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های PSOCC و ACORCC داشته است. مقادیر دو و یک به ترتیب برای پارامترهای C_1 و C_2 مناسب‌ترین مقادیر بوده که مطابق با نتایج گلدبرگ (۱۹۸۹) هم‌مقدار C_1 از C_2

منابع مورد استفاده

آذرآزاد، ه.، رضایی، ح.، بهمنش ج و بشارت س، ۱۳۹۱. مقایسه نتایج به‌کارگیری الگوریتم‌های PSO، GA، SA، در بهینه‌سازی سیستم‌های تک مخزنه (مطالعه موردی: سد شهر چای، ارومیه). نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، شماره ۵، صفحه‌های ۱۱۰۱ تا ۱۱۰۸.

- آزادانیا ا و زهرایی ب، ۱۳۸۹. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی PSO در بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری از مخازن سدها. پنجمین کنگره مهندسی عمران. صفحه‌های ۱ تا ۸. دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۹.
- اکبرپور م ج و موسوی ج، ۱۳۸۵. نخبه‌گزینی از جواب‌های شدنی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه. صفحه‌های ۱ تا ۸. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۳ و ۴ بهمن‌ماه ۱۳۸۵.
- برهانی داریان ع و شهیدی ل، ۱۳۸۷. بررسی و کاربرد الگوریتم شبیه‌سازی آنیلینگ در بهره‌برداری بهینه از منابع آب و مقایسه آن با دیگر روش‌های کاوشی. علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱۹، شماره ۸، صفحه‌های ۳۱ تا ۴۰.
- برهانی داریان ع و مرادی ام، ۱۳۸۹. الگوریتم مورچگان پیوسته در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی، مطالعه موردی: مخازن حوضه کرخه. مجله آب و فاضلاب، جلد ۲۱، شماره ۷۶، صفحه‌های ۸۱ تا ۹۱.
- برهانی داریان ع و نایینی م، ۱۳۸۷. مقایسه کاربرد روش‌های فراکاوشی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب. آب و فاضلاب، جلد ۱۹، شماره ۶۸، صفحه‌های ۵۷ تا ۶۶.
- جداری عیوضی ج، مقیمی ا، یمانی م و محمدی ح، ۱۳۸۹. تأثیر عوامل اکومورفولوژیک بر کیفیت شیمیایی آب مطالعه موردی: رودخانه کر و دریاچه سد درودزن. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، جلد ۲۲، شماره ۱۵، صفحه‌های ۱۷ تا ۳۷.
- جهان‌پور م ا و صادقیان ج، ۱۳۸۸. کاربرد الگوریتم ژنتیک ترکیبی در تعیین سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد کلان ملایر در شرایط خشک‌سالی هیدرولوژیکی. صفحه‌های ۱ تا ۹. دومین همایش سدسازی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ۱۰ اسفندماه ۱۳۸۸.
- معینی ر و افشار م، ۱۳۸۷الف. بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با استفاده از الگوریتم مورچه پیشینه-کمینه (MMAS). مجله علمی پژوهشی شریف، جلد ۱۲، شماره ۴۶، صفحه‌های ۸۵ تا ۹۳.
- معینی ر و افشار م، ۱۳۸۷ب. به‌کارگیری الگوریتم مقید جامعه مورچگان در حل مسائل مقید سریالی. صفحه‌های ۱ تا ۹. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز، تبریز، ۲۳ تا ۲۵ مهرماه ۱۳۸۷.
- نژاد نادری م، حسامی کرمانی م و هاشمی‌نسب س، ۱۳۹۰. کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد کلان ملایر. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی. صفحه‌های ۱ تا ۹. دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۹ و ۲۰ بهمن‌ماه ۱۳۹۰.
- Afshar MH, 2010. A parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: constrained and unconstrained approach. *Advances in Engineering Software* 41: 188-195.
- Box GEP and Muller ME, 1958. A note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematic Statistics* 29: 610-611.
- Darlane AR and Moradi AM, 2009. Reservoir operating by ant colony optimization for continuous domains (ACOR) case study: Dez reservoir. *International Journal of Engineering and Applied Sciences* 5: 16-25.
- Goldberg D, 1989. *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Company. Boston.
- Holland JH, 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor.
- Kangrang A and Lokham Ch, 2013. Optimal reservoir rule curves considering conditional ant colony optimization with simulation model. *Journal of Applied Sciences* 13: 154-160.
- Kennedy J and Eberhart R, 1995. Particle swarm optimization. Pp. 1942-1948. In: *Proceeding of International Conference on Neural Networks*. Perth, Australia.
- Kjeldsen, TR and Rosbjerg D, 2004. Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Science Journal* 49: 757 – 767.

- Kumar DN, Srinivasa RK and Ashok B, 2006. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 132: 123-129.
- Kumar DN and Reddy J, 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management* 3: 192-201.
- Liu Y, 2009. Automatic calibration of a rainfall-runoff model using a fast and elitist multi objective particle swarm algorithm. *Expert Systems with Applications* 36: 9533-9538.
- Reddy MJ and Kumar DN, 2007. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation. *Hydrological Processes* 21:2897-2909.
- Shi Y and Eberhart R, 1998. Parameter selection in particle swarm optimization. In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds). *Evolutionary Programming* 7: 611-616.
- Socha K and Dorigo M, 2008. Ant colony optimization for continuous domains. *European Journal of Operational Research* 185: 1155-1173.