مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
اسفند ۱۳۸۷، شماره‌ی چهل و ششم، ص. ۸۵-۹۳، (یادداشت فنی)

بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با استفاده از الگوریتم مورچه بیشینه - کمینه (MMAS)

رامتین معینی (دانشجوی دکتری)
محمدهادی افشار (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

rmoeini@iust.ac.ir
mhafshar@iust.ac.ir

یکی از مهم‌ترین مسائل بهینه‌سازی در حوزه‌ی مدیریت منابع آب، که الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی برای حل آن به کار گرفته شده است، مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد است. امروزه برای حل این‌گونه مسائل از الگوریتم‌های فراکاوشی[1] بیشتر از سایر الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها[2] است که اولین الگوریتم پیشنهاد شده برمبنای آن، روش سیستم مورچه می‌باشد. در طول سالیان اخیر نیز برای عملکرد بهتر این روش و کاهش معایب آن ــ ازجمله پدیده‌ی هم‌گرایی نابه‌هنگام مسئله ـ الگوریتم اصلی و پایه‌ی جامعه‌ی مورچه‌ها اصلاح، و الگوریتم‌های جدیدی بر مبنای آن تعریف شده است. یکی از این الگوریتم‌ها که در این نوشتار نیز از آن استفاده شده است، الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه[3] است. اولین گام برای حل مسئله با استفاده از این الگوریتم، در نظرگرفتن متغیر تصمیم مناسب برای مسئله است، و سپس با توجه به این متغیر، گراف مناسبی برای مسئله تعریف می‌شود. در این نوشتار برای حل مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دو حالت در نظرگرفته شده است. در حالت اول، متغیر تصمیم در نظرگرفته شده عبارت است از مقدار آب رهاسازی شده از مخزن، و در حالت دوم این متغیر عبارت است از میزان آب ذخیره شده در مخزن در هر ماه. در این نوشتار مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه و برای هر دو حالت فوق حل شده است و در نهایت، نتایج به دست آمده با نتایج دیگر روش‌های به کار گرفته شده برای حل این مسائل بررسی و مقایسه شده است. این مقایسه حاکی از آن است که نتایج روش سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه مناسب‌تر است. همچنین مدل‌سازی این مسائل و حل آن‌ها با استفاده از نسخه ۸ نرم‌افزار Lingo، نشان‌دهنده‌ی آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم جواب تقریباً مناسبی با هزینه‌ی محاسباتی مناسب برای مسائل حاصل شده است.

واژگان کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها، سیستم مورچه‌های بیشینه‌ـ کمینه(MMAS)، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد.

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی آب که سال‌ها مورد بحث و تبادل نظر بین محققین مختلف علوم مهندسی و آب بوده است، مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها است. منابع آب به‌منظور دست‌یابی به اهداف گوناگونی همچون تأمین نیازهای آبی، کنترل و کاهش خسارت‌های سیلاب، تولید انرژی برقابی و غیره مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. یکی از سازه‌های ساخته‌شده برای این منظور، «سد» است. لذا مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها یکی از اهداف مهندسین منابع آب است. الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی برای حل این مسئله ارائه شده است. با افزایش ابعاد و نیز پیچیده‌ترشدن مسائل، امکان حل با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی و یا روش‌های صریح محاسباتی در زمان مناسب و یا با حافظه‌ی محاسباتی محدود موجود کاهش یافته است، و رسیدن به جواب بهینه‌ی مطلق در این شرایط بسیار مشکل است. همچنین در بسیاری از مسائل واقعی مهندسی آب، تصمیم‌گیرنده فقط با رسیدن به جواب‌های خوب مناسب و نه‌فقط جواب بهینه‌ی مطلق ارضا می‌شود. به‌این ترتیب امکان استفاده از روش‌های کاوشی یا الگوریتم‌های تکاملی که تضمین‌کننده‌ی جواب بهینه‌ی مطلق نبوده ولی در هنگام حل مسئله، جواب‌های ممکن مختلفی ایجاد کرده و نهایتاً بهترین جواب را که جواب خوب و مناسبی است انتخاب می‌کنند؛ مورد توجه قرارگرفته است. یکی از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی که امروزه مورد استفاده قرارگرفته است الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO) است.[1] در طول سالیان اخیر نیز این الگوریتم توسعه یافته و معایب آن اصلاح

شده است و نیز الگوریتم‌های دیگری از این الگوریتم منشعب شده است. ازجمله‌ی این الگوریتم‌های انشعابی می‌توان به الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه اشاره کرد که مسائل مختلف بهینه‌سازی ــ مانند مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد[۴] ــ با به‌کارگیری این الگوریتم‌ها حل شده است.[۲و۳]

در این نوشتار ابتدا توضیحاتی مختصر درباره‌ی الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO) و همچنین الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه (MMAS) داده شده است. سپس مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی مخزن سد دز، با استفاده از الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه، و در دو حالت حل شده است. در حالت اول مقدار آب رهاشده از مخزن در هر دوره‌ی زمانی(r_t) و در حالت دوم میزان حجم آب ذخیره‌شده‌ی مخزن در هر دوره‌ی زمانی(s_t) به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است. سپس با تعریف گراف مناسب، این مسائل با به‌کارگیری الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه حل شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده از حل مسئله با روش الگوریتم جامعه‌ی مورچه‌ها و همچنین نتایج مدل‌سازی این مسائل و حل آن‌ها با استفاده از نرم افزار Lingo مقایسه شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها «ACO»

بخشی از روش‌های بهینه‌سازی بر پایه‌ی رفتار اجتماعی حشرات ایجاد شده است. در بین رفتارهای مختلف حشرات، رفتار جست‌وجوی غذا یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد این‌گونه سیستم‌های مصنوعی بوده است. از جمله‌ی این حشرات می‌توان به مورچه اشاره کرد. مورچه‌ها در طبیعت عموماً کور هستند، اما با استفاده از حس بویایی مسیریابی می‌کنند. مورچه‌های مصنوعی اولین بار توسط Colorni و همکارانش در سال ۱۹۹۱ معرفی شد.[۴] این الگوریتم براساس رفتار طبیعی مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر ممکن بین لانه و منبع غذا شکل گرفته است که با شبیه‌سازی مورچه‌های واقعی که‌در طبیعت به دنبال غذا می‌گردند، محدوده‌ی وسیعی را جست‌وجو می‌کنند. وقتی مورچه‌یی به دنبال غذا می‌رود، در طول مسیر حرکت خود ماده‌ی بوداری به‌نام فرامان[۵] از خود به جا می‌گذارد، که سایر مورچه‌های در جست‌وجوی غذا را به عبور از آن مسیر تشویق می‌کند.[۵و۶] با عبور مورچه‌ها از یک مسیر، غلظت فرامان آن مسیر افزایش یافته و احتمال انتخاب این مسیر توسط مورچه‌های بعدی نیز افزایش می‌یابد.[۷و۸] این فرایند اصلاح محیط، به‌منظور تشویق تغییر در رفتار برای ایجاد ارتباط را استیگمرجی[۶](پیرارسانش) می‌نامند که اولین‌بار در سال ۱۹۵۹ توسط Grasse مطرح شد.[۹] براساس این خصوصیت رفتاری مورچه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO) پیشنهاد شد.[۴و۱۰] در الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO)، جامعه‌یی[۷] از مورچه‌های مصنوعی برای یافتن جواب‌های بهینه در مسائل بهینه‌سازی گسسته با یکدیگر همکاری می‌کنند[۱۱] اولین الگوریتم شکل گرفته بر این اساس، الگوریتم سیستم مورچه(AS) بود. مسائل مختلفی با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها حل شده است. ازجمله مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد، رنگ‌بندی گراف، مسئله‌ی روندیابی شبکه و مسئله‌ی شبکه‌ی انتقال آب با استفاده از این الگوریتم مورد بررسی قرارگرفته است.[۲و۱۲و۱۳و۱۴]

برای حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به‌کمک الگوریتم سیستم مورچه، باید گرافی برای مسئله تعریف شود. به‌عنوان نمونه، گراف G = (D, L, C) را در نظر بگیرید که در آن $D = \{d_۱, d_۲, ..., d_n\}$ مجموعه‌ی نقاط تصمیم است، $L = \{L_{ij}\}$ مجموعه انتخاب‌های j ($j = ۱, ۲, ..., J$) در هریک از نقاط تصمیم i (i=۱,۲,.....,n) و $C = \{C_{ij}\}$ مجموعه هزینه‌های هریک از انتخاب‌های L_{ij} است. یک مسیر موجه[۸] تعریف شده برای نمودار را یک جواب (ϕ)، و مسیری که کم‌ترین هزینه را داشته باشد یک جواب بهینه[۹] (φ^*) می‌نامند. هزینه‌ی هر جواب را با $f(\phi)$ و هزینه‌ی جواب بهینه را با $f(\phi^*)$ نشان می‌دهند.[۱۰] به‌طورکلی مراحل اساسی و اصلی الگوریتم مورچه‌را می‌توان چنین برشمرد[۱۰]:

۱. m مورچه بر روی n نقطه‌ی تصمیم در نظر گرفته می‌شود و در ابتدا یک مقدار فرامان مناسب بر روی تمام مسیرهای گراف در نظر گرفته می‌شود.

۲. در هر نقطه‌ی تصمیم i برای انتخاب گزینه‌ی j یک تابع احتمال تعریف شده است(فرمول ۱). در هر نقطه‌ی تصمیم براساس رابطه‌ی ۱ گزینه‌ی مطلوب انتخاب می‌شود و این روند تا موقع عبور از کلیه‌ی نقاط تصمیم ادامه می‌یابد. زمانی که کلیه‌ی نقاط تصمیم پوشش داده شود، یک جواب (ϕ)ساخته شده است.

$$P_{ij}(k,t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum\limits_{j=۱}^{J}[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\mu_{ij}]^{\beta}} \tag{۱}$$

در فرمول ۱، $P_{ij}(k,t)$ برابر است با احتمال این که مورچه‌ی kام در دوره‌ی زمانی tام و نقطه‌ی‌تصمیم iام، گزینه‌ی jام را انتخاب کند؛ τ_{ij} مقدار فرامان مسیر گزینه‌ی jام در نقطه‌ی تصمیم iام؛ و μ_{ij} مقدار هدایت‌گر کاوشی مسیر گزینه‌ی jام در نقطه‌ی تصمیم iام است. دو پارامتر α و β ضرایب ثابتی هستند که در رابطه‌ی فوق به‌ترتیب برای تنظیم وزن فرامان (τ_{ij}) و اطلاعات کاوشی(μ_{ij}) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حل مسائل با تنظیم این پارامترها می‌توان به سمت جواب‌های بهتر حرکت کرد.

۳. براساس تابع هدف تعریف شده، هزینه‌ی بهترین جواب تولیدشده در آن تکرار محاسبه می‌شود.

۴. بعد از انجام مراحل دوم و سوم، فرامان مسیر اصلاح شده و به تکرار بعد می‌رویم. فرم کلی رابطه‌ی اصلاح فرامان عبارت است از:

$$\tau_{ij}(t+۱) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \tag{۲}$$

که در آن ρ ضریب تبخیر فرامان نامیده می‌شود و عددی بین ۰ و ۱ است. هدف از به‌هنگام‌سازی و اصلاح فرامان، تمرکز بیشتر فرایند جست‌وجوی مورچه‌ها بر روی منطقه‌یی مناسب از فضای جست‌وجو است، که امید می‌رود با متمرکزکردن جست‌وجو در آن منطقه، به جواب مطلوب‌تری برسیم.

مبحث به‌هنگام‌سازی فرامان شاید بخشی از الگوریتم مورچه‌ها باشد که بیشترین مطالعه برروی آن صورت گرفته است. تاکنون روش‌های مختلفی برای به‌هنگام‌سازی فرامان پیشنهاد شده است. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های مختلف مورچه درچگونگی محاسبه‌ی مقدار $\Delta\tau_{ij}$ و نحوه‌ی اعمال آن است. خصوصیات رفتار جست‌وجوگر الگوریتم مورچه‌ها را می‌توان با تعریف دو واژه‌ی «اکتشاف[۱۰]» و «بهره‌برداری[۱۱]» مشخص کرد. «اکتشاف» توانایی الگوریتم در جست‌وجوی گسترده و وسیع فضای جست‌وجو است؛ و «بهره‌برداری» توانایی الگوریتم در جست‌وجوی موضعی در فضای همسایگی جوابی است که قبلاً پیدا شده است. افزایش بهره‌برداری ممکن است باعث همگرایی سریع مسئله به یک جواب غیربهینه یا بهینه‌ی موضعی شود، و افزایش اکتشاف باعث افزایش هزینه‌ی محاسباتی در یافتن جواب‌های مناسب به‌دلیل همگرایی کند مسئله می‌شود. بنابراین برقراری تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری لازم است و برهمین اساس الگوریتم‌های مختلفی از الگوریتم ACO منشعب شده است.[۱۵] یکی از مهم‌ترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه (MMAS) است که در ادامه به آن اشاره می‌کنیم.

سیستم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه (MMAS)

یکی از مشکلاتی که در اکثر الگوریتم‌ها روی می‌دهد، پدیده‌ی «همگرایی نابه‌هنگام» یا همگرایی زودرس است. برای جلوگیری از وقوع این پدیده، در سال ۲۰۰۰ الگوریتم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه (MMAS) پیشنهاد شد. اساس این روش بر پایه‌ی تعریف مرزهای دینامیکی برای شدت غلظت فرامان مسیرها است، به‌گونه‌یی که غلظت فرامان همه‌ی مسیرها در محدوده‌ی این مرز تعریف شده قرار بگیرد.[۱۶و۱۷] مرز بالایی فرامان در هر تکرار ($\tau_{\max}$)، از فرمول ۳ محاسبه می‌شود:

$$\tau_{\max}(t) = \frac{1}{1-\rho}\frac{\phi}{f(s^{gb}(t))} \qquad (۳)$$

که در آن $\tau_{max}(t)$ مرز بالایی فرامان در هر تکرار t، ρ ضریب تبخیر فرامان، ϕ ضریب جبران فرامان (معمولاً $\phi = 1$)، $s^{gb}(t)$ جواب بهینه در دوره‌ی tام، و $f(s^{gb}(t))$ هزینه‌ی جواب بهینه در دوره tام است. مرز پایین فرامان ($\tau_{\min}$) نیز از فرمول ۴ قابل محاسبه است:

$$\tau_{\min}(t) = \frac{\tau_{\max}(t)(1-\sqrt[n]{P_{best}})}{(NO_{avg}-1)\sqrt[n]{P_{best}}} \qquad (۴)$$

که در آن $\tau_{\min}(t)$ مرز پایینی فرامان در هر تکرار t، $\tau_{max}(t)$ مرز بالایی فرامان در هر تکرار t، P_{best} ضریبی است که مقدار آن با احتمال انتخاب بهترین جواب‌های بهینه‌ی موضعی برابر است (همان‌گونه که فرمول نشان می‌دهد، مقدار کم‌تر P_{best} باعث کوچک‌شدن محدوده‌ی فرامان می‌شود)؛ و NO_{avg} برابر با میانگین تعداد مسیرها و موقعیت‌های موجود در هر نقطه‌ی تصمیم مسئله است. چنان که مشاهده می‌شود، با تعریف حد بالا و حد پایین مسئله، پدیده‌ی اکتشاف در این روش اعمال شده است و برای این که بتوان بین این پدیده و همچنین پدیده‌ی «بهره‌برداری» تعادل برقرار کرد، فرمول به‌هنگام‌سازی فرامان مطابق فرمول ۵ تعریف شده است:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{ib}(t) + \Delta\tau_{ij}^{gb}(t) I_N\{\frac{t}{T_{gb}}\} \qquad (۵)$$

در فرمول ۵، در انتهای هر تکرار فرامان بهترین مسیری که در آن تکرار طی شده ($s_l(t)$) اصلاح شده و فرامان این مسیر افزایش می‌یابد (جمله‌ی $\Delta\tau_{ij}^{ib}(t)$ در فرمول ۵)، و نیز بعد از هر دوره‌ی زمانی T_{gb} فرامان مسیری که تا این تکرار بهترین جواب بهینه‌ی موضعی ($s^{gb}(t)$) را تولید کرده است، به‌هنگام‌سازی کرده و فرامان آن مسیر افزایش داده می‌شود (جمله‌ی $\Delta\tau_{ij}^{gb}(t)$ در فرمول ۵). منظور ازجمله‌ی $I_N\{\frac{t}{T_{gb}}\}$ در فرمول ۵ این است که هرگاه مقدار $\frac{t}{T_{gb}}$ عددی صحیح شود، مقدار این عبارت برابر عدد ۱ است و در بقیه‌ی موارد این عبارت برابر صفر است.[۱۸و۱۹] مقدار $\Delta\tau_{ij}^{ib}(t)$ طبق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$\Delta\tau_{ij}^{ib}(t) = \frac{\phi}{f(s_l(t))} I_{s_l(t)}\{(i,j)\} \qquad (۶)$$

که در آن ϕ ضریب جبران فرامان نامیده می‌شود و معمولاً برابر با ۱ است، $(s_l(t))$ بهترین جواب حاصله در دوره‌ی تکرار tام، و $f(s_l(t))$ هزینه‌ی بهترین جواب حاصله در دوره‌ی تکرار tام است.

$$I_{s_l(t)} = \begin{cases} 1 & \text{اگرمسیرانتخاب‌شده‌مسیر بهترین جواب‌تولیدشده‌درتکرار t ام‌باشد} \\ 0 & \text{درغیراین صورت} \end{cases}$$

به کار بردن این روش برای حل مسائل بهینه‌سازی همانند مسئله‌ی «فروشنده‌ی دوره‌گرد» نشان‌دهنده‌ی آن است که در این روش پدیده‌ی ایستایی[۱۲] کم‌تر اتفاق می‌افتد و الگوریتم مورچه عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورچه‌ی تعریف‌شده خواهد داشت. همچنین در سال ۲۰۰۴ این الگوریتم برای حل مسئله‌ی شبکه‌ی انتقال آب به کارگرفته شد و با به‌کارگیری الگوریتم سیستم مورچه بیشینه ـ کمینه، نتایج مناسبی برای این مسئله به دست آمد.[۱۴]

بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

یکی از مسائل مهم در زمینه‌ی مهندسی مدیریت منابع آب، مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد است. منابع آب به‌منظور دست‌یابی به اهداف گوناگونی چون تأمین نیازهای آبی، کنترل و کاهش خسارت‌های سیلاب، تولید انرژی برقابی، و غیره مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. یکی از سازه‌هایی که برای این منظور ساخته می‌شود، سدها هستند. مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها یکی از اهداف مهندسین منابع آب است، که الگوریتم‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای حل آن به‌کار گرفته شده است. ازجمله روش‌های حل مسئله‌ی بهینه‌سازی می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی خطی[۱۳]، برنامه‌ریزی غیر خطی[۱۴] و برنامه‌ریزی پویا[۱۵] اشاره کرد، که با به‌کارگیری آن‌ها مسائل متعددی حل شده است. با افزایش ابعاد مسائل و نیز پیچیده‌ترشدن آن‌ها، امکان حل با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی، روش‌های صریح محاسباتی در زمان مناسب، یا با حافظه‌ی محاسباتی محدود موجود کاهش یافته و رسیدن به جواب بهینه‌ی مطلق در این شرایط بسیار مشکل است. همچنین در بسیاری از مسائل واقعی مهندسی آب، تصمیم‌گیرنده فقط با رسیدن به جواب‌های خوب مناسب و نه‌تنها جواب بهینه‌ی مطلق ارضا می‌شوند. به این ترتیب امکان استفاده از روش‌های کاوشی یا الگوریتم‌های تکاملی[۱۶] که تضمین‌کننده‌ی جواب بهینه‌ی مطلق نیستند مورد توجه قرارگرفته است. با استفاده از این روش‌ها، به‌هنگام حل مسئله جواب‌های مختلفی ایجاد می‌شود و نهایتاً بهترین جواب را، که جواب خوب و مناسبی است، انتخاب می‌کنند. یکی از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی که امروزه مورد استفاده قرارگرفته است الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO) است.

برای حل این‌گونه مسائل تهیه‌ی مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای مسئله ضروری است. در یک مدل بهینه‌سازی (برای بیشینه یا کمینه‌سازی تابع هدف تحت یک سری قیود)، مقادیر متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شود. برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در حل یک مسئله‌ی خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را برای مسئله‌ی مورد نظر تعریف کرد. در مسئله‌ی بهره‌برداری مخزن، متغیر تصمیم مسئله ممکن است حجم ذخیره‌ی مخزن در هر دوره‌ی زمانی، s(t)، یا میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره‌ی زمانی، r(t)، باشد. در این نوشتار برای حل مسئله‌ی نمونه هر دو مورد به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. در مسئله‌ی بهره‌برداری مخزن، تابع هدف را می‌توان به‌صورت‌های مختلف تعریف کرد. در مسئله‌ی بهره‌برداری ساده هدف کمینه‌سازی میزان کمبود اعمال شده به یک نیاز مشخص است. تابع هدف تعریف‌شده برای این مسئله به‌صورت رابطه‌ی ۷ است (که هدف کمینه‌سازی مقدار آن است):

$$O.F,\ Minimize\ \sum_{t=1}^{NT}[\frac{D_t - r_t}{D_{\max}}]^2 \qquad (۷)$$

که در آن NT کل دوره‌های زمانی؛ D_t میزان نیاز در دوره‌ی زمانی tام؛ r_t میزان

رهاسازی در دوره‌ی زمانی tام؛ و D_{max} بیشینه‌ی نیاز کل دوره‌های زمانی (NT) است. برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی، تابع هدف تعریف شده به‌صورت رابطه‌ی ۸ است(که هدف کمینه‌سازی مقدار آن است):

$$O.F: \ Minimize \ \sum_{t=1}^{NT}(1-\frac{p_t}{power}) \quad (8)$$

که در آن NT کل دوره‌های زمانی؛ p_t توان تولیدی نیروگاه در دوره‌ی زمانی tام (برحسب مگاوات)؛ و $Power$ نشانگر ظرفیت نصب نیروگاه (برحسب مگاوات) است. مقدار توان تولیدی نیروگاه در دوره‌ی زمانی tام مطابق فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$p_t = min[(\frac{g \times \eta \times R_t}{PF}) \times (\frac{h_t}{1000}), power] \quad (9)$$

$$h_t = (\frac{H_t + H_{t+1}}{2}) - TWL \quad (10)$$

در فرمول‌های فوق g شتاب ثقل (برحسبm^2/s)، η بازده نیروگاه، PF ضریب کارکرد نیروگاه، h_t بار آب مؤثر بر نیروگاه (که طبق رابطه‌ی ۱۰ و برحسب متر) محاسبه می‌شود، H_t تراز مخزن از سطح دریا (برحسب متر)، R_t میزان دبی آب عبوری از توربین در دوره زمانی tام؛ TWL تراز پایاب نیروگاه‌از سطح دریا (برحسب متر)، و $Power$ نشانگر ظرفیت نصب نیروگاه (برحسب مگاوات) است. در روابط تولید انرژی، بار آب مؤثر بر توربین‌ها (H_t) می‌بایست تعریف شود. برای استفاده‌از مقادیر حجم-ارتفاع مخزن می‌توان یک چندجمله‌یی بر مقادیر برازش داده شود. درخصوص قیدهای موجود در مبحث بهره‌برداری مخزن، می‌توان قیدهای هر دو مسئله‌ی مورد بررسی را به‌صورت رابطه‌ی زیر تعریف کرد. اصلی‌ترین قید مسئله رابطه‌ی پیوستگی است:

$$s(t+1) = s(t) + I(t) - r(t) - l(t) \quad (11)$$

که در آن $S(t)$ حجم مخزن در ابتدای دوره‌ی زمانیtام؛ $I(t)$ میزان جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی زمانی tام؛ $r(t)$ میزان رهاسازی از مخزن در دوره‌ی زمانی tام؛ و $l(t)$ میزان تلفات در دوره‌ی زمانی tام است. ازجمله قیود دیگر مسئله عبارت است از:

$$r_{min} \leq r(t) \leq r_{\max} \quad (12)$$

$$s_{min} \leq s(t) \leq s_{\max} \quad (13)$$

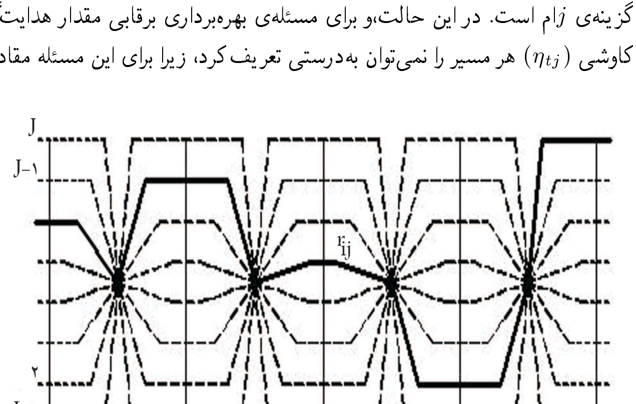
که در آن‌ها r_{min} کم‌ترین میزان رهاسازی از مخزن، r_{max} بیشترین میزان رهاسازی از مخزن، s_{min} کم‌ترین حجم مجاز مخزن، و s_{max} بیشترین حجم مجاز مخزن است. روش‌های مختلفی برای اعمال قیود مسئله وجود دارد. یکی از روش‌های معمول در حل مسائل مقید، منظورکردن ضریب جریمه[17] برای تابع هدف مسئله است. اعمال ضریب جریمه نیز شیوه‌های مختلفی دارد. یکی از شیوه‌های به‌کارگیری آن، که در این نوشتار نیز به کار گرفته شده است، روش ضریب جریمه ثابت است که در آن، هنگامی که جواب غیرموجه[18] باشد، مقدار تخلف از قیود محاسبه و در یک مقدار ثابت(که ضریب جریمه نامیده می‌شود) ضرب، و با تابع هدف جمع می‌شود. به‌عبارت دیگر تابع هدف به رابطه‌ی ۱۴تبدیل می‌شود:

$$F_p = \begin{cases} F & \text{if solution is feasible} \\ F + \alpha_p \times \sum_{t=1}^{NT} CSV_t & \text{O.W} \end{cases} \quad (14)$$

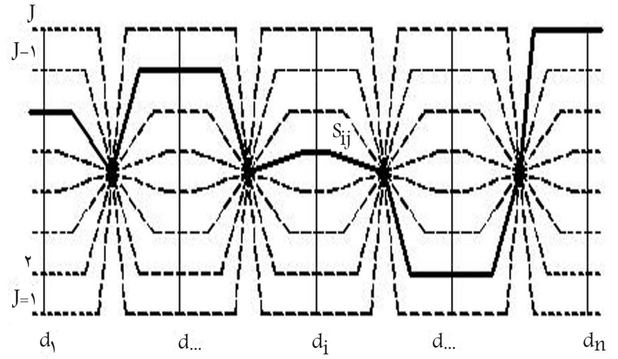
که در آن F مقدار حقیقی تابع هدف، F_p مقدار تابع هدف جریمه‌دار، CSV_t مقدار تخلف از قیود در دوره‌ی زمانی tام، و α_p ضریب جریمه است. مقدار این ضریب نباید بسیار بزرگ یا بسیار کوچک باشد. در نظر گرفتن مقدار کوچک برای ضرایب جریمه منجر به صرف هزینه‌ی محاسباتی زیاد برای رسیدن به جواب امکان‌پذیر یا هدایت مسئله به‌سمتی می‌شود که جواب‌ها امکان‌پذیر نیست. در نظر گرفتن مقادیر بسیار بزرگ برای ضرایب جریمه نیز منجر به محدود و کوچک‌شدن فضای جست‌وجوی مسئله، و درنتیجه همگرایی مسئله به سمت جواب‌های بهینه‌ی مقطعی می‌شود. لذا مقدار این ضریب باید درحدود مقدار حقیقی تابع هدف باشد، که مقدار بهینه‌ی آن برای هر مسئله با سعی و خطا به دست می‌آید. در نخستین گام به‌منظور حل مسئله به‌روش ACO لازم است برای مسئله یک گراف تعریف کنیم. همان‌طور که گفته شد برای حل مسائل ۲ حالت در نظر گرفته شده است. یک بار میزان خروجی از مخزن در هر دوره‌ی زمانی، و بار دیگر میزان حجم ذخیره‌ی مخزن در هر دوره‌ی زمانی به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. درصورتی که مقدار آب رها شده از مخزن سد به‌عنوان متغیر تصمیم در نظرگرفته شود، محدوده‌ی مقادیر مجاز رهاسازی از مخزن در هر گام زمانی به چندین مسیر (دسته) تقسیم می‌شود که هریک از آن‌ها گزینه‌های موجود برای هر متغیر تصمیم هستند؛ به هر یک از این مسیرها یک عدد نسبت داده می‌شود. در این حالت شکل گراف به‌طور شماتیک به‌صورت شکل ۱ تعریف می‌شود (در شکل ۱ یک جواب مسئله با خط پررنگ نشان داده شده است). در این حالت میزان آب رها شده از مخزن در دوره‌های زمانی را به‌عنوان متغیر تصمیم منظورکرده‌ایم، و بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر با تعداد دوره‌های زمانی است (به‌عبارت دیگر n=NT و در حالت کلی که حجم اولیه‌ی مخزن معلوم نباشد آن‌را نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم منظور می‌کنیم و بنابراین $n = NT + 1$). در این حالت و برای هر دو مسئله‌ی نمونه مقدار فرامان اولیه که به همه‌ی مسیرها نسبت داده می‌شود برابر عدد ثابت ۱ منظور می‌شود ($\tau_{tj} = 1$). برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده مقدار هدایت‌گرکاوشی هر مسیر (η_{tj}) به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌شود (برای آن که در هنگام حل مسئله به جواب‌های بهتری برسیم، هدایت‌گر کاوشی باید به‌صورت جزئی از تابع هدف تعریف شود.)

$$\eta_{tj} = \frac{1}{(D_t - r_{tj})^2} \quad (15)$$

که در آن η_{tj} مقدار هدایت‌گرکاوشی برای دوره‌ی زمانی tام و گزینه‌ی jام، D_t میزان نیاز در دوره‌ی زمانی tام، و r_{tj} مقدار آب رهاشده از مخزن در دوره‌ی زمانی tام و گزینه‌ی jام است. در این حالت،و برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی مقدار هدایت‌گر کاوشی (η_{tj}) هر مسیر را نمی‌توان به‌درستی تعریف کرد، زیرا برای این مسئله مقادیر



شکل ۱. گراف مسئله در حالتی که میزان رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شود.



شکل ۲. گراف مسئله در حالتی که میزان حجم آب ذخیره شده در مخزن به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شود.

تابع هدف در هر دوره به هر دو «مقدار آب رهاسازی شده از مخزن» و «مقدار حجم آب ذخیره‌ی مخزن» وابسته است. بنابراین در این حالت و برای این مسئله‌مقادیر هدایت‌گر کاوشی را برابر عددی ثابت (به‌عنوان مثال عدد ثابت ۱) منظور می‌کنیم.

درصورتی که مقدار حجم آب ذخیره شده در مخزن سد به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شود، محدوده‌ی مقادیر مجاز حجم ذخیره‌ی آب در مخزن در هر دوره‌ی زمانی، به چندین مسیر (دسته) تقسیم شده و به هر یک از مسیرها یک عدد نسبت داده می‌شود. در این حالت، گراف به‌صورت شکل ۲ تعریف می‌شود (در شکل ۲ یک جواب مسئله با خط پررنگ نشان داده شده‌است). در این حالت مقدار حجم ذخیره شده در مخزن محدود سد در دوره‌های زمانی را به‌عنوان متغیر تصمیم منظور کرده‌ایم، و بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم برابر با تعداد دوره‌های زمانی است؛ به‌عبارت دیگر n=NT. در حالت کلی که حجم اولیه‌ی مخزن معلوم نباشد آن را نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای تصمیم منظور می‌کنیم و بنابراین $n = NT + ۱$. برای هر دو مسئله نمونه مقدار فرامان اولیه که به همه‌ی مسیرها نسبت داده می‌شود برابر عدد ثابت ۱ منظور می‌شود. ($\tau_{ij} = ۱$). در این حالت برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده امکان تعریف مقادیر هدایت‌گر کاوشی (همانند رابطه‌ی ۱۵) وجود ندارد، لذا مقادیر آن برای تمامی مسیرها عددی ثابت (برای مثال عدد ثابت ۱) منظور می‌شود. ($\eta_{tj} = ۱$). برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی نیز مقدار هدایت‌گر کاوشی هر مسیر (η_{tj}) را نمی‌توان به‌درستی تعریف کرد زیرا برای این مسئله مقادیر تابع هدف در هر دوره به هر دو مقدار آب رهاسازی شده از مخزن و مقدار حجم آب ذخیره‌ی مخزن وابسته است. بنابراین در این حالت و برای این مسئله مقادیر هدایت‌گر کاوشی را برابر عددی ثابت (مثلاً عدد ثابت ۱) منظور می‌کنیم.

مسائل نمونه

مسائل نمونه‌ی مورد بررسی، مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دز است. برای این مسائل دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول میزان آب خروجی از سد در هر ماه، و در حالت دوم میزان حجم آب ذخیره شده در مخزن در هر ماه به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. این مسائل برای یک دوره‌ی ۵ ساله یا ۶۰ ماهه ($NT = ۶۰$) حل شده است. در این مسائل به‌ازاء هر ماه یک متغیر تصمیم منظور شده است و بنابراین برای این مسائل ۶۰ متغیر تصمیم خواهیم داشت(در هر دو حالت مقدار حجم ذخیره‌ی اولیه‌ی مخزن معلوم فرض شده است). تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده مطابق رابطه‌ی ۷ و برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی مطابق رابطه‌ی ۸ است. گراف‌های تعریف‌شده برای این مسائل در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. اصلی‌ترین قید مسائل، معادله‌ی پیوستگی (معادله‌ی ۱۰) است. حجم ابتدایی مخزن معلوم و برابر ۱۴۳۰ میلیون متر مکعب است. حجم بیشینه و کمینه‌ی مخزن نیز به‌ترتیب ۳۳۴۰ میلیون متر مکعب و ۸۳۰ میلیون متر مکعب است (این بازه به‌منظور گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم مسئله و تعریف نمودار مسئله در حل حالت دوم، در نظرگرفته شده است). به‌عبارت دیگر:

$$۸۳۰ \leq s(t) \leq ۳۳۴۰ \tag{۱۶}$$

بیشینه و کمینه‌ی میزان خروجی آب از مخزن در هر دوره‌ی زمانی نیز به‌ترتیب ۱۰۰۰ میلیون متر مکعب و صفر است (این بازه به‌منظور گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم مسئله و تعریف نمودار مسئله در حل حالت اول، در نظرگرفته شده است). به‌عبارت دیگر:

$$۰ \leq r(t) \leq ۱۰۰۰ \tag{۱۷}$$

نیروگاه سد دز از ۸ واحد ۸۰٫۸ مگاواتی تشکیل شده است که زمان کارکرد آن در طول روز حدود ۱۰ ساعت است. به‌این ترتیب در محاسبات، ضریب کارکرد معادل ۰٫۴۱۷ است. ظرفیت نصب نیروگاه معادل ۶۵۰ مگاوات و بازده آن ۹۰٪ منظور شده است. برای تعیین مقدار آب موثر، تراز پایاب نیروگاه سد دز معادل ۱۷۲ متر از سطح دریا منظور شده است. چنان که اشاره شد در روابط تولید انرژی، تعریف بار آب مؤثر بر توربین‌ها (H_t) ضروری است. برای استفاده از مقادیر حجم ـ ارتفاع مخزن، یک چندجمله‌یی درجه ۳ بر مقادیر برازش داده شده است. این رابطه به همراه ضرایب آن به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ است:

$$\begin{aligned} &H(t) = a + b \times s(t) + c \times s(t)^{۲} + d \times s(t)^{۳} \\ &a = ۲۴۹٫۸۳۳۶۴ \\ &b = ۰٫۰۵۸۷۲۰۵ \\ &c = -۱٫۳۷ \times ۱۰^{-۵} \\ &d = ۱٫۵۲۶ \times ۱۰^{-۹} \end{aligned} \tag{۱۸}$$

مقدار تلفات ($l(t)$) برای حل این مسائل معادل صفر منظور شده است. مقدار ضریب جریمه‌ی مناسب برای هر یک از مسائل نمونه با توجه به موارد اشاره شده و با استفاده از روش سعی و خطا به دست آمده است. مقادیر پارامترهای η و τ برای هر یک از مسائل نمونه در بخش قبلی توضیح داده شده است.

نتایج

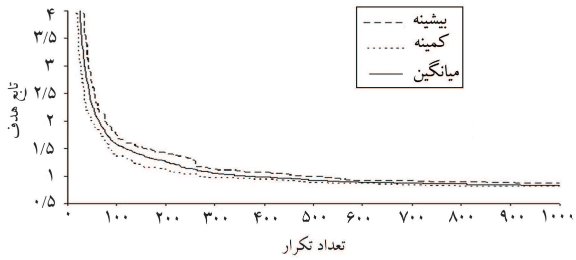
مسائل نمونه با به‌کارگیری الگوریتم مورچه بیشینه ـ کمینه حل شده است. چنان که اشاره شد به‌دلیل ماهیت تصادفی و تقریبی این الگوریتم، پارامترهای زیادی برای این الگوریتم باید تعریف شوند. تغییر هرکدام از این پارامترها منجر به تغییر عملکرد مدل، همگرایی و مرغوبیت جواب‌ها خواهد شد. به این ترتیب باید این پارامترها در بهترین حالت تنظیم شوند. مسئله‌ی نمونه‌ی بهره‌برداری ساده، در حالت اول با استفاده از روش MMAS و به‌ازای مقادیر جدول ۱ حل شده است. چنان‌که می‌دانیم ماهیت مسئله یک مسئله‌ی پیوسته است، اما اگر این مسئله با استفاده از این الگوریتم حل شود باید محدوده‌ی مجاز گسسته شود. ابتدا این محدوده به ۱۸ دسته گسسته‌سازی

جدول ۱. مقادیر پارامترهای روش MMAS برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در حالت اول

تعداد گسسته‌سازی	P_{best}	ρ	β	α	تعداد تکرار	تعداد مورچه
۱۸	۰٫۱۵	۰٫۹	۰٫۱	۱	۱۰۰۰	۲۰۰

جدول ۲. مقادیر تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا (حالت اول)

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف
۰٫۸۳۲۳۹۶	۰٫۸۰۰۸۲۱	۰٫۸۵۱۱۶۰



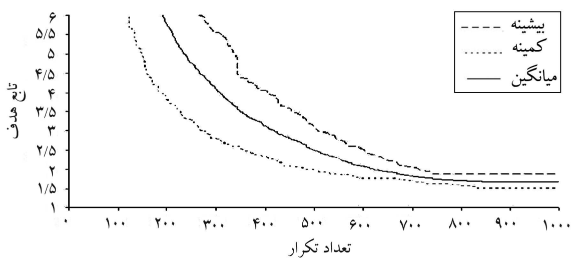
نمودار ۱. مقادیر میانگین و بیشینه و کمینه مقدار تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا (حالت اول).

جدول ۳. مقادیر پارامترهای روش MMAS برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در حالت دوم

تعداد گسسته‌سازی	P_{best}	ρ	β	α	تعداد تکرار	تعداد مورچه
۱۸	۰٫۱۵	۰٫۹	۰٫۱	۱	۱۰۰۰	۲۰۰

جدول ۴. مقادیرتابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا (حالت دوم)

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف
۱٫۶۶۸۴۱	۱٫۴۸۳۵۶	۱٫۸۶۳۰۷

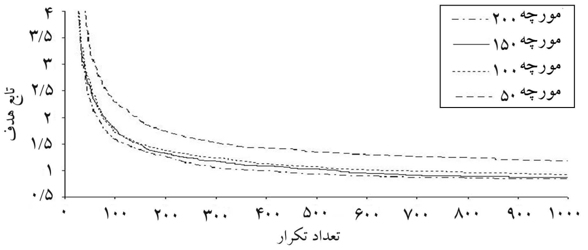


نمودار ۲. مقادیر میانگین و بیشینه و کمینه مقدار تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا (حالت دوم).

شده، و در ادامه تأثیر تعداد گسسته‌سازی بر روی جواب‌ها مورد بررسی قرارگرفته است. مقادیر تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه و به‌ازاء مقادیر جدول ۱، مطابق جدول ۲ و نمودار ۱ است. این مسئله با به‌کارگیری الگوریتم استاندارد جامعه‌ی مورچه‌ها حل شده است،[۲۰] و بهترین جواب حاصله معادل ۰٫۹۲۶ بوده که با ۱۰۰ مورچه و ۱۰۰۰ تکرار به دست آمده است. همچنین این مسئله با به‌کارگیری الگوریتم پیشرفته‌ی جامعه‌ی مورچه‌ها حل شده است،[۲۰] و بهترین جواب حاصله معادل ۰٫۸۸۸ بوده که با ۱۰۰ مورچه و ۱۰۰۰ تکرار به دست آمده است. چنان که مشاهده می‌شود جواب حاصله از روش MMAS در مقایسه با این جواب‌ها بهتر است. جواب بهینه‌ی مطلق این مسئله که با مدل‌سازی و حل آن با استفاده از نسخه‌ی ۸ نرم‌افزار Lingo حاصل شده، معادل ۰٫۷۹۶ است. بررسی جدول ۲ و نمودار ۱ بیان‌کننده‌ی آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم مقادیر مناسب، و با هزینه‌ی محاسباتی مناسب برای مسئله حاصل شده است. اگر حاصل‌ضرب تعداد مورچه‌ها در تعداد تکرار به‌عنوان عملگر ارزیابی در نظرگرفته شود، این مسئله در عملگر ارزیابی ۱۷۹۴۰۰ به کم‌ترین مقدار خود رسیده است. مدت زمان اجرای برنامه برای رایانه‌ی‌پنتیوم ۴ با حافظه‌ی ۲۵۶ مگابایت، معادل ۲۷۰ ثانیه است. با افزایش تعداد تکرار، محدوده‌ی تغییرات تابع هدف کم‌تر شده و مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع هدف (برای اجراهای مختلف) به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. همچنین مقدار تابع هدف به مقدار بهینه‌ی مطلق نزدیک‌تر شده است. به‌منظور مقایسه‌ی دو حالت در نظرگرفته شده، مسئله‌ی نمونه‌ی بهره‌برداری ساده در حالت دوم با استفاده از روش MMAS و به‌ازاء مقادیر ارائه شده در جدول ۳ حل شده است. چنان که می‌دانیم مسئله ماهیتاً پیوسته است، اما اگر این مسئله با استفاده از این الگوریتم حل شود باید محدوده‌ی مجاز گسسته شود. ابتدا این محدوده به ۱۸ دسته گسسته‌سازی شده، و در ادامه تأثیر تعداد گسسته‌سازی بر روی جواب‌ها مورد بررسی قرارگرفته است. مقادیر تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه و به‌ازاء مقادیر جدول ۳، مطابق جدول ۴ و نمودار ۲ است. بررسی جدول ۴ و نمودار ۲ بیان‌کننده‌ی آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم، مقادیر مناسبی برای مسئله حاصل شده است، هر چند که این جواب‌ها در مقایسه با جواب‌های حالت قبل نامرغوب‌تر است. علت این نامرغوبی در ۲ نکته است: نخست آن که در حالت اول، به‌دلیل انتخاب میزان آب رهاسازی شده از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم، امکان تعریف مقادیر هدایتگر کاوشی (μ_{ij}) وجود دارد (معادله‌ی ۱۵)، درحالی که در حالت دوم تعریف این مقادیر ممکن نیست. ثانیاً طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت دوم از طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت اول بیشتر است. در این حالت، این مسئله در عملگر ارزیابی ۱۶۷۲۰۰ به کم‌ترین مقدار خود رسیده است. مدت زمان اجرای برنامه برای رایانه‌ی پنتیوم ۴ با حافظه‌ی ۲۵۶ مگابایت، معادل ۲۷۵ ثانیه است. با افزایش تعداد تکرار محدوده‌ی تغییرات تابع هدف کم‌تر شده و مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع هدف (برای اجراهای مختلف) به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. همچنین مقدار تابع هدف به مقدار بهینه‌ی مطلق نزدیک‌تر شده است. برای به دست آوردن بهترین پارامترهای مربوط به روش MMAS، باید آنالیز حساسیت برای کلیه‌ی پارامترها انجام داده شود. مقادیر α، β، ρ و P_{best} در جداول فوق، بهترین مقادیری است که به‌ازای آنها جواب بهینه برای این مسئله‌حاصل شده است. برای بررسی تأثیر تعداد مورچه بر روی جواب در حالت اول، از مقادیر جدول ۱ استفاده شده و فقط تعداد مورچه‌ها تغییر داده شده است. جدول ۵ و نمودار ۳ نشان‌دهنده‌ی اثر تعداد مورچه‌ها بر روی جواب است، و چنان که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مورچه‌ها میزان مرغوبیت جواب‌ها افزایش یافته است. برای بررسی تأثیر تعداد گسسته‌سازی بر روی جواب در حالت

جدول ۵. مقادیر تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و به‌ازای تعداد مورچه‌های مختلف برای ۱۰ بار اجرا(حالت اول).

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	تعداد مورچه
۱٫۱۷۵۲۴	۱٫۰۵۴۲۷	۱٫۴۰۷۱۵	۵۰
۰٫۹۲۱۶۱۷	۰٫۸۶۳۱۳۵	۱٫۰۳۵۹۹	۱۰۰
۰٫۸۷۰۱۷۷	۰٫۸۲۲۰۶۴	۰٫۹۳۴۲۲۵	۱۵۰
۰٫۸۳۲۳۹۶	۰٫۸۰۰۸۲۱	۰٫۸۵۱۱۶۰	۲۰۰



نمودار ۳. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا و تعداد مورچه‌های متفاوت (حالت اول).

اول، از مقادیر جدول ۱ استفاده شده و فقط تعداد نقاط گسسته‌سازی تغییر داده شده است. جدول ۶ نشان‌دهنده‌ی تأثیر تعداد نقاط گسسته‌سازی بر روی جواب است. مقادیر جدول ۶ نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش تعداد نقاط گسسته‌سازی میزان مرغوبیت جواب‌ها لزوماً افزایش نمی‌یابد و ممکن است حتی از میزان آن نیز کاسته شود. علت این امر بزرگی مقیاس مسئله است (چون فضای جست‌وجوی مسئله بزرگ‌تر شده است). همچنین با افزایش تعداد نقاط گسسته‌سازی محدوده‌ی دامنه‌ی تغییرات جواب‌ها افزایش یافته است. برای بررسی تأثیر تعداد مورچه بر روی جواب در حالت دوم، از مقادیر جدول ۳ استفاده شده و فقط تعداد مورچه‌ها تغییر داده شده است. جدول ۷و نمودار ۴ نشان‌دهنده‌ی اثر تعداد مورچه‌ها بر روی جواب‌اند ومقادیر ارائه شده در آن‌ها بیان‌گر آن است که با افزایش تعداد مورچه‌ها میزان مرغوبیت جواب‌ها افزایش یافته است. برای بررسی تأثیر تعداد گسسته‌سازی بر روی جواب در حالت دوم، از مقادیر جدول ۳ استفاده شده و فقط تعداد نقاط گسسته‌سازی تغییر داده شده است. جدول ۸ نشان‌دهنده‌ی اثر تعداد نقاط گسسته‌سازی بر روی جواب است. مقادیر جدول ۸ نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش تعداد نقاط گسسته‌سازی میزان مرغوبیت جواب‌ها لزوماً افزایش نمی‌یابد و حتی ممکن است از مقدار آن نیز کاسته شود. علت این امر بزرگی مقیاس مسئله است (چون فضای جست‌وجوی مسئله بزرگ‌تر شده است). مسئله‌ی نمونه‌ی بهره‌برداری برقابی، در حالت اول با استفاده از روش MMAS وبه‌ازاء مقادیر جدول ۹ حل شده است. چنان که می‌دانیم این مسئله ماهیتاً پیوسته‌است، اما اگر با استفاده از این الگوریتم حل شود، باید محدوده‌ی مجاز گسسته شود. ابتدا این محدوده به ۱۸ مسیر گسسته‌سازی شده است. این مسئله با به‌کارگیری الگوریتم استاندارد جامعه‌ی مورچه‌ها حل شده است،[۲۰] و بهترین جواب حاصله معادل ۳۷٫۳ بوده که با ۱۰۰ مورچه و ۱۰۰۰ تکرار به دست آمده است و یک جواب غیرموجه بوده است. همچنین این مسئله با به‌کارگیری الگوریتم پیشرفته‌ی جامعه‌ی مورچه‌ها نیز حل شده است،[۲۰] و بهترین جواب حاصله معادل ۱۱٫۹۱۶ بوده که با ۱۰۰ مورچه و ۱۰۰۰ تکرار به دست آمده است که یک جواب موجه است. چنان که مشاهده می‌شود جواب حاصله از روش MMAS از این جواب‌ها

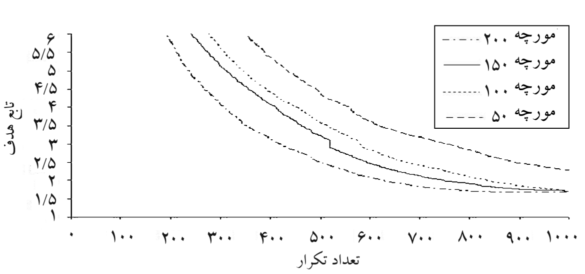
جدول ۶. مقادیر تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و به‌ازای تعداد گسسته‌سازی‌های مختلف برای ۱۰ بار اجرا(حالت اول).

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	تعداد نقاط گسسته‌سازی
۰/۸۳۲۳۹۶	۰/۸۰۰۸۲۱	۰/۸۵۱۱۶۰	۱۸
۰/۸۹۴۶۰۰	۰/۸۳۱۴۴۴	۰/۹۶۳۲۰۳	۴۰
۰/۹۳۵۴۷۳	۰/۸۶۸۲۲۱	۰/۹۹۴۰۱۶	۶۰
۰/۹۵۸۴۷۹	۰/۹۰۲۹۰۸	۱/۰۵۱۷۹	۸۰
۰/۹۱۸۴۵۹	۰/۸۹۳۷۲۷	۰/۹۷۱۱۸۵	۱۰۰

جدول ۷. مقادیر تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و به‌ازای تعداد مورچه‌های مختلف برای ۱۰ بار اجرا(حالت دوم).

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	تعداد مورچه
۲٫۲۶۳۲	۱٫۶۶۲۳۱	۲٫۹۵۷۱۱	۵۰
۱/۷۰۸۱۷	۱/۴۱۶۵۱	۲/۰۱۲۶۰	۱۰۰
۱/۷۲۰۷۷	۱/۲۸۵۵۷	۲/۵۷۵۸۹	۱۵۰
۱/۶۶۸۴۱	۱/۴۸۳۵۶	۱/۸۶۳۰۷	۲۰۰

بهتر است. همچنین جواب به دست آمده برای جواب بهینه‌ی مطلق این مسئله که با مدل‌سازی و حل آن با استفاده از نسخه‌ی ۸ نرم‌افزار Lingo به دست آمده، معادل ۷٫۳۷۲ است. بررسی جدول ۱۰ و نمودار ۵ بیان‌گر آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم مقادیر مناسب و با هزینه‌ی محاسباتی مناسب برای مسئله حاصل شده است. این مسئله در عملگر ارزیابی ۱۸۹۴۰۰ به کم‌ترین مقدار خود رسیده است. مدت زمان اجرای برنامه برای رایانه‌ی پنتیوم ۴ با حافظه‌ی ۲۵۶ مگابایت، معادل ۲۴۲ ثانیه است. با افزایش تعداد تکرار محدوده‌ی تغییرات تابع هدف کم‌تر شده و مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع هدف (برای اجراهای مختلف) به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. همچنین مقدار تابع هدف به مقدار بهینه‌ی مطلق نزدیک‌تر شده است.
به‌منظور مقایسه دو حالت در نظر گرفته شده، مسئله نمونه بهره‌برداری برقابی در حالت دوم با استفاده از روش MMAS و به‌ازاء مقادیر جدول ۱۱ حل شده است. چنان که می‌دانیم مسئله ماهیتاً پیوسته است، اما اگر این مسئله با استفاده از این الگوریتم حل شود، باید محدوده‌ی مجازگسسته شود. ابتدا این محدوده به ۱۸ مسیر گسسته‌سازی شده است. مقادیر تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای برنامه و به‌ازاء مقادیر جدول ۱۱، مطابق جدول ۱۲ و نمودار ۶ است. بررسی جدول ۱۲ و نمودار ۶ بیان‌گر آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم،مقادیر مناسبی برای مسئله حاصل شده است،



نمودار ۴. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا و تعداد مورچه‌های متفاوت (حالت دوم).

جدول ۸. مقادیر تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و به‌ازای تعداد گسسته‌سازی‌های مختلف برای ۱۰ بار اجرا(حالت دوم).

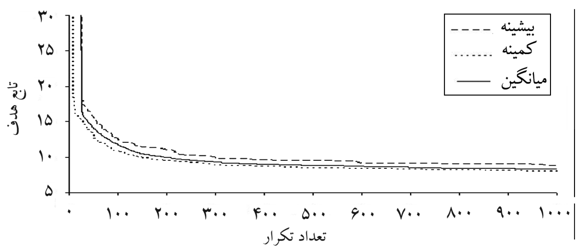
میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف	تعداد نقاط گسسته‌سازی
۱/۶۶۸۴۱	۱/۴۸۳۵۶	۱/۸۶۳۰۷	۱۸
۱/۵۰۲۸۵	۱/۱۷۷۳۲	۱/۲۷۹۵۱	۴۰
۱/۵۲۱۶۷	۱/۱۷۳۸۳	۱/۷۰۵۷۶	۶۰
۱/۵۱۵۳۲	۱/۳۶۴۰۶	۱/۶۸۱۹۳	۸۰
۱/۴۹۶۶۰	۱/۱۲۵۶۲	۱/۸۲۵۹۹	۱۰۰

جدول ۹. مقادیر پارامترهای روش MMAS برای مسئله بهره‌برداری برقابی در حالت اول.

تعداد گسسته‌سازی	P_{best}	ρ	β	α	تعداد تکرار	تعداد مورچه
۱۸	۰٫۲	۰٫۹	۰٫۱	۱	۱۰۰۰	۲۰۰

جدول ۱۰. مقادیر تابع هدف مسئله بهره‌برداری برقابی و ۱۰ بار اجرا(حالت اول).

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف
۸٫۸۳۳۶۹۹	۸٫۰۲۲۸۹	۸٫۶۹۹۶۹



نمودار ۵. مقادیر میانگین و بیشینه و کمینه مقدار تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری برقابی و ۱۰ بار اجرا (حل حالت اول).

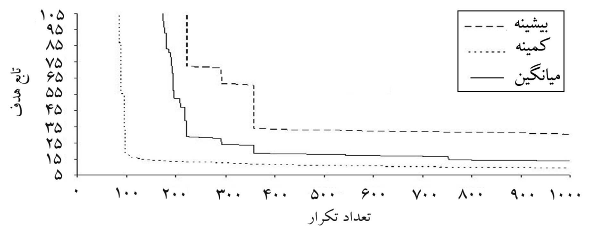
هر چند که این جواب‌ها در مقایسه با جواب‌های حالت قبل نامرغوب‌تر است. علت آن است که طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت دوم از طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت اول بیشتر است. در این حالت، این مسئله در عملگر ارزیابی ۱۶۷۲۰۰ به مقدار کمینه‌ی خود رسیده است. مدت زمان اجرای برنامه برای رایانه‌ی پنتیوم ۴ با حافظه‌ی ۲۵۶ مگا بایت معادل ۲۴۲ ثانیه است. با افزایش تعداد تکرار محدوده‌ی تغییرات تابع هدف کم‌تر شده و مقادیر بیشینه و کمینه‌ی تابع هدف (برای اجراهای مختلف) به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند. همچنین مقدار تابع هدف به مقدار بهینه‌ی مطلق نزدیک‌تر شده است. برای به دست آوردن بهترین پارامترهای مربوط به روش MMAS، باید آنالیز حساسیت درمورد کلیه‌ی پارامترها انجام شود. مقادیر α , β , ρ و P_{best} در جداول فوق، بهترین مقادیری است که به‌ازای آنها جواب بهینه برای این مسئله حاصل شده است. همچنین برای به دست آوردن مقادیر بهینه تعداد مورچه‌ها و تعداد گسسته‌سازی می‌توان همانند مسئله‌ی قبل آنالیز حساسیت برای این دو پارامتر را انجام داد.

جدول ۱۱. مقادیر پارامترهای روش MMAS برای مسئله بهره‌برداری برقابی در حالت دوم.

تعداد گسسته‌سازی	P_{best}	ρ	β	α	تعداد تکرار	تعداد مورچه
۱۸	۰٫۲	۰٫۹	۰٫۱	۱	۱۰۰۰	۲۰۰

جدول ۱۲. مقادیر تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری برقابی و ۱۰ بار اجرا(حالت دوم).

میانگین مقدار تابع هدف	کم‌ترین مقدار تابع هدف	بیشترین مقدار تابع هدف
۱۳٫۸۵۸۸	۹٫۹۳۶۳۳۹۳	۳۰٫۱۵۶۹



نمودار ۶. مقادیر میانگین و بیشینه و کمینه مقدار تابع هدف برای مسئله بهره‌برداری برقابی و ۱۰ بار اجرا (حل حالت دوم).

نتیجه‌گیری

در این نوشتار مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم مورچه‌ی بیشینه ـ کمینه و در نظر گرفتن دو متغیر تصمیم، و در دو حالت حل شده است. در حالت اول میزان آب رهاسازی شده از مخزن، و در حالت دوم میزان حجم آب ذخیره شده در مخزن سد به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از حل ۲ مسئله‌ی نمونه در ۲ حالت ذکرشده با نتایج دیگر روش‌های بهینه‌سازی، نشان‌دهنده‌ی آن است که با به‌کارگیری این الگوریتم جواب مناسبی همراه با هزینه‌ی محاسباتی مناسب حاصل شده است. مقایسه‌ی نتایج الگوریتم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه با نتایج الگوریتم جامعه‌ی مورچه‌های استاندارد و پیشرفته نشان‌دهنده‌ی آن است که الگوریتم مورچه‌های بیشینه ـ کمینه نسبت به دو روش نتایج بهینه‌ی مناسب‌تری نتیجه می‌دهد. همچنین، با مقایسه‌ی دو حالت ارائه‌شده برای هر دو مسئله نشان داده شد که در حل مسئله در حالت اول (یعنی وقتی که متغیر تصمیم مقدار آب رهاسازی شده از مخزن در هر دوره‌ی زمانی باشد)، نسبت به حل مسئله در حالت دوم (یعنی وقتی که متغیر تصمیم مقدار حجم آب ذخیره شده در مخزن در هر دوره‌ی زمانی باشد)، مقادیر بهینه‌ی مناسب‌تری حاصل شده و سرعت همگرایی آن بیشتر است. علت این امر را در دو نکته می‌توان جست‌وجو کرد: اول آن که برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در حالت اول، به‌دلیل انتخاب میزان آب رهاسازی شده از مخزن در هر ماه به‌عنوان متغیر تصمیم، امکان تعریف مقادیر هدایت‌گر کاوشی وجود دارد، در حالی که در حالت دوم امکان تعریف این مقادیر ممکن نیست. دوم آن که برای هر دو مسئله‌ی نمونه طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت دوم از طول بازه گسسته‌سازی شده‌ی متغیر تصمیم در حالت اول بیشتر است. چنان که مشاهده شد، جواب‌های حاصله برای این مسائل تحت تأثیر پارامترهای مختلف الگوریتم است، که برای رسیدن به بهترین جواب برای کلیه‌ی پارامترهای این الگوریتم باید آنالیز حساسیت انجام شود.

پانوشت

1. meta-heuristic
2. ant colony optimization(ACO)
3. Max-Min ant system
4. TSP
5. pheromone
6. stigmergy
7. colony
8. feasible
9. optimal solution
10. exploration
11. exploitation
12. stagnation
13. linear programming
14. non-linear programming
15. dynamic programming
16. foraging
17. penalti
18. infeasible

منابع

1. Blum, C., Roli, A. "Meta-heuristics in Combinatorial Optimization: overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, **36**(3), pp. 268-308 (September 2003).
2. Dorigo M.; Gambardella, L.M. "Ant Colony for the Traveling Salesman problem", *Biosystems* , **43**, pp. 13-81 (1999).
3. Dorigo, M. "Ant Algorithms Solve Difficult Optimization Problems", *Artificial Life*, LNAI 2159, springer-verlag,and pp. 11-22, (2001).
4. Colorni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V. "Distributed optimization by ant colonies", In: *proceedings of ECAL91-European Conference on Artificial Life*, Elsevier Publishing, pp. 134-142 (1991).
5. Dorigo, M. "Optimization, Learning ant Natural Algorithms", Ph.D. Thesis, politiecnico di milano, Milano, (1992).
6. Dorigo, M. "Ant colony optimization web page", http://iridia.ulb.ac.be/∼mdorigo/ACO/ACO.himl.
7. Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. "The ant system: ant autocatalytic optimization process", *Technical Report*, TR 91-016, politiecnico di Milano, (1991).
8. Dorigo, M.; Di Caro G. "The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic", In: *New Ideas in optimization*, D. Corne, M. Dorigo and F. Glover (ed.), pp. 11-32 McGraw-Hill, (1999).
9. Hertz, J.; Krogh, A.; and palmer, R.G. Introduction to the Theory of Neural Computation, Addison Wesely, (1991).
10. Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. "The ant system : Optimization by a Colony of cooperating agents",*IEEE Transaction on systems*, Man, Cybernetics-part B, *26*, pp. 29-41 (1996).
11. Dorigo, M.; Di Caro, G.; Gambardella, L.M. "Ant Algorithms for Discrete Optimization", *Artificial Life*, *5*(2), pp.137-172 (1999).
12. Costa, D.; Hertz, A." Ants can color graphs", *J. Operate Res. Soc.*, *48*, pp. 295-305 (1997).
13. Di Caro, G.; Dorigo, M. "Two ant colony algorithms for best-effort quality of service routing", Unpublished at ANTS'98-From Ant colonies to Artificial Ants: First International Workshop on Ant Colony Optimization, (1998).
14. Afshar, M.H. "A new transition rule for ant colony optimization algorithms: application to pipe networks optimization problems", *Engineering Optimization*, **37**(5), pp. 525-540 (July 2005).
15. Stutzlt, T.; Hoos, H. "Improvements on the ant system: Introducing MAX-MIN ant system", *In proceeding of International Conference on artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*, pp. 245-249 Springer Verlag, Wien, (1997).
16. Stutzle, T.; Dorigo, M."A short Convergence Proof for a class of ACO Algorithms", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*(4), pp. 358-365 (2002).
17. Stutzle, T.; Hoos, H. "MAX-MIN ant system", *Future Generation Computer Systems*, **16**(8), pp. 889-914 (2000).
18. Stutzle, T.; Hoss, H. "MAX-MIN Ant system and Local search for combinatorial optimization problems", In S.VOB, S. Martello, I.H. Osman and C. Roucairol (ed.), *Meta Heuristics: Advances and Trends in local search paradigms for optimization*, pp. 137-154 Kluwer, Boston, (1998).
19. Zecchin, C.A.; Maier, H.R. Simpson, A.R.; Leonard, M.; Nixon, J.B. "Ant colony optimization Applied to water Distribution system Design: A comparative study of five Algorithms", *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*, **133**(1), pp. 87-92 (2007).
20. Jalali, M.R. "Optimal design and operation of hydrosystems by ant colony algorithms: new hearistic approach" ph.D-Thesis, Department of civil Engineering, Iran university of Science ant Technology (2005).