مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۲، ص. ۷۹-۸۶

تعیین ظرفیت بهینه‌ی مخزن سد با اعمال کنترل روی اعتمادپذیری تأمین نیاز با استفاده از روش ترکیبی برنامه‌ریزی خطی ـ الگوریتم ژنتیک

علی عطارزاده (کارشناس ارشد)
سیدجمشید موسوی (دانشیار)
احمد طاهرشمسی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

در این نوشتار مسئله‌ی تعیین ظرفیت بهینه‌ی مخزن سد با کنترل اعتمادپذیری تأمین نیازهای آبی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی بررسی شده است. اعمال کنترل بر اعتمادپذیری، نیازمند استفاده از متغیرهای دومقداره و توسعه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط با اعداد صحیح (MILP) است؛ لذا مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک ـ برنامه‌ریزی خطی (GA-LP) برای حل مدل‌های MILP توسعه یافته است که در آن متغیرهای دومقداره با GA تولید و تکامل می‌یابد و مدل خطی باقیمانده در هر بار ارزیابی تابع هدف در GA حل می‌شود. این مدل به همراه روش شاخه و حد و روش الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی ظرفیت مخزن سد چراغ ویس، شامل تعداد ۴۲۰ تا ۸۴۰ متغیر صفر و یک، به‌منزله‌ی مطالعه‌ی موردی به‌کار رفته و مقایسه شده‌اند. نتایج بیانگر قابلیت مطلوب و لیکن نسبی الگوریتم پیشنهادی، از نظر سرعت محاسباتی و کیفیت جواب‌ها در مقایسه با روش شاخه و حد و الگوریتم ژنتیک در حل مدل‌های تحت بررسی است. علی‌رغم آن تولید تصادفی متغیرهای صفر و یک در GA در مسائل بزرگ‌مقیاس، مستلزم تلاش‌های محاسباتی قابل‌ملاحظه برای هدایت الگوریتم پیشنهادی به سمت جواب‌های مناسب است.

واژگان کلیدی: مخازن سطحی، بهینه‌سازی ظرفیت، برنامه‌ریزی خطی، الگوریتم ژنتیک.

attarzadeh.a@gmail.com
jmosavi@aut.ac.ir
tshamsi@aut.ac.ir

مقدمه

استفاده از مدل‌های ریاضی برای بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از مخازن سدها، به‌منزله‌ی عناصر کنترل و ذخیره‌ی جریان آب رودخانه‌ها، سال‌هاست که مورد توجه پژوهشگران بوده است. از طرفی فرمول‌بندی و حل مدل‌های مذکور در صورت احتساب حتی بخشی از شرایط واقعی مسئله با پیچیدگی‌های مختلفی از جمله غیرخطی‌بودن روابط و غیرپیوسته و تصادفی‌بودن متغیرها همراه است.

در مدل‌های بهینه‌سازی طراحی مخازن سدها با هدف کمینه‌سازی ظرفیت مخزن و یا بیشینه‌سازی سود خالص حاصل از طراحی و بهره‌برداری، تمایل به استفاده از مدل‌های خطی به دلیل سرعت و کارایی الگوریتم‌های حل مشهود است. علی‌رغم آن، گرچه در اغلب مطالعات کاربردی هدف تأمین نیازهای مختلف آبی از طریق ظرفیت ذخیره‌ی سد پیگیری می‌شود، با این‌حال تأمین تمامی نیازها در تمامی دوره‌ها (حتی دوره‌های خشک) مستلزم طراحی سدی با ارتفاع زیاد است که در این‌صورت بخش عمده‌یی از هزینه و ظرفیت سد برای تأمین نیازها در بخش کوچکی از عمر مفید سد، ظرفیت‌سازی خواهد شد. این رویکرد خصوصاً اگر منابع دیگر نظیر آب‌های زیرزمینی در تأمین نیازها موجود باشد، ممکن است اقتصادی نباشد. بنابراین ضروری است در روش و مدل پیشنهادی این امکان که در درصد مشخصی از دوره‌ها ـ که توسط مدل‌ساز از قبل تعیین خواهد شد ـ تأمین‌نشدن بخشی از نیازها لحاظ شود. چنانچه این ضرورت ظاهراً ساده بخواهد در قالب رابطه‌ها و محدودیت‌های یک مدل بهینه‌سازی ترجمه شود، به معنی استفاده از نوعی محدودیت‌های احتمالاتی[1] در مدل است که در برخی موارد قابلیت نقض را دارند. راه‌حل‌های مرسوم برای حل این‌گونه مدل‌ها، استفاده از مدل‌های احتمالاتی صریح و یا برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) است، چرا که احتساب این‌گونه محدودیت‌ها در مدل بهینه‌سازی معین[2] نیازمند افزودن متغیرهای دومقداره[3] در ساختار مدل است. نتیجتاً مدل حاصل در شرایط اعمال کنترل بر قید اعتمادپذیری تأمین نیازهای آبی، به یک مدل MILP تبدیل می‌شود. از طرفی زمان حل روش‌های کلاسیک در مدل‌های با تعداد متغیرهای عدد صحیح زیاد می‌تواند

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۱۱/۱۵، داوری ۱۳۸۷/۹/۱۷، پذیرش ۱۳۸۸/۸/۲۶.

بسیار طولانی شود و یا در مواردی احتمال عدم توانایی آن‌ها در همگرایی به جواب موجود است.

استفاده از روش‌های جایگزین خصوصاً روش‌های فراکاوشی و جستجوی تکاملی به دلیل خصوصیات جستجوی هوشمند تصادفی و عدم نیاز به اطلاعات مشتق توابع در حل چنین مسائلی که در آن‌ها ماهیت ترکیباتی[۴] مطرح است، امیدوارکننده بوده است.[۱] الگوریتم‌های ژنتیک در سال ۱۹۷۵ با رویکرد به تکامل تدریجی موجودات زنده توسعه یافت،[۲] و در زمینه‌های مختلف مهندسی آب از جمله بهینه‌سازی شبکه‌ی توزیع آب،[۳] مدیریت منابع آب زیرزمینی[۴] و استخراج قوانین بهره‌برداری از مخازن به‌کار گرفته شد.[۵] علی‌رغم قابلیت روش‌های کاوشی و فراکاوشی، این روش‌ها در هدایت فرایند جستجو به سمت درون یا نزدیکی مرزهای فضای موجه در فضای بسیار بزرگ و چند بُعدی خصوصاً در شرایطی که مقادیر متغیرهای مسئله از طریق قیود مختلف به‌هم وابسته هستند، بسیار دشوار است. همچنین تنظیم ضرایب جریمه برای ارضاء قیود نیازمند تجربه‌ی کافی و زمان‌بر است.

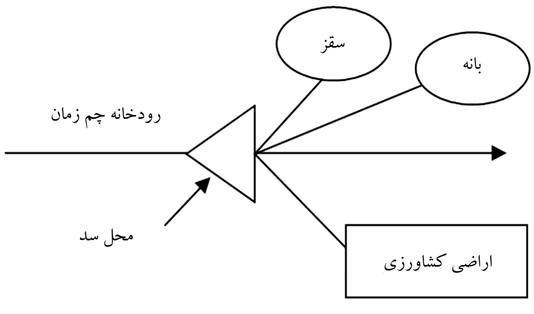
سرعت بالای روش‌های برنامه‌ریزی خطی در مقایسه با روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی[۵] و الگوریتم‌های تکاملی و کاوشی از یک طرف و قابلیت روش‌های کاوشی در اداره‌ی خصوصیات غیرخطی و ترکیباتی مسئله از طرف دیگر، سبب مطرح‌شدن ایده‌ی استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی[۶] شده‌است. در این رویکرد هم از مزایای سرعت روش‌های برنامه‌ریزی خطی و هم از مزایای جستجوی هوشمند الگوریتم‌های تکاملی بهره‌گیری می‌شود. در این رابطه می‌توان به مدل‌های GA-LP [۶] و مدل PSO-NFP [۷] اشاره‌کرد.

در مطالعه‌ی حاضر مسئله‌ی تعیین ظرفیت بهینه‌ی مخزن (ارتفاع) سد چراغ ویس، با اعمال کنترل و تنظیم سطح اعتمادپذیری در تأمین انواع نیازهای آبی شُرب وکشاورزی در قالب یک مدل MILP فرمول‌بندی و سپس الگوریتم‌های GA-LP به‌عنوان یک الگوریتم ترکیبی با روش‌های GA و شاخه و حد[۷] مقایسه شده است.

مطالعه‌ی موردی و فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی

سد مخزنی چراغ ویس در استان کردستان حد فاصل شهرهای سقز و بانه در مختصات جغرافیایی ۶′ ,۴۶° طول شرقی و ۱۱′ ,۳۶° عرض شمالی و در فاصله‌ی تقریبی ۱۷ کیلومتری شهر سقز با قطع جاده‌ی ارتباطی سقز و بانه بر روی رودخانه چم‌خان از سر شاخه‌های چم سقز احداث می‌شود.

این سد ضمن تأمین نیاز شرب شهرهای سقز به میزان ۳۲ میلیون مترمکعب (افق ۱۴۳۰) و بانه به میزان ۱۰٫۱۴ میلیون مترمکعب (افق ۱۴۰۰) قادر به تأمین سالیانه حدود ۴۳ میلیون مترمکعب آب برای مصارف کشاورزی است و حدود ۵۰۰۰ هکتار از اراضی پایاب سد را تحت پوشش خود قرار می‌دهد (شکل ۱). این سد



شکل ۱. شماتیک سیستم منابع آب مطالعه‌ی موردی.

از لحاظ سازه‌یی از نوع سنگریزه‌یی با هسته‌ی رسی قائم است. همچنین کمینه‌ی دبی زیست محیطی طرح در بازه‌های پایین دست محل سد ۰٫۱۲۱ مترمکعب در ثانیه برآورد شده است.[۸] هدف تعیین کمینه‌ی حجم نرمال سد (کمینه‌ی حجم و بیشینه‌ی بهره‌برداری) با توجه به قیود و فرضیات ذکر شده است:[۸]

۱. نیاز آب شرب دو شهر سقز و بانه در تمام ماه‌ها کاملاً تأمین شود؛
۲. نیاز آب کشاورزی در کمینه‌ی ۸۰٪ از ماه‌ها کاملاً تأمین شود؛
۳. در ماه‌هایی که نیاز آب کشاورزی کاملاً تأمین نمی‌شود (بیشینه‌ی ۲۰٪ ماه‌ها)، کمینه‌ی ۲۵٪ از آب مورد نیاز کشاورزی تأمین شود؛
۴. نسبت کل کمبود آب کشاورزی به آب مورد نیاز بیشینه‌ی ۵٪ باشد؛
۵. کمینه‌ی دبی زیست محیطی در پایین دست حفظ شود؛
۶. از آب مازاد بر نیازهای شرب وکشاورزی فقط می‌توان برای نیازهای زیست‌محیطی استفاده کرد؛
۷. کمینه‌ی حجم سد (حجم مرده) بر اساس تخمین رسوبات وارده ۲۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است؛
۸. میزان اعتمادپذیری و نسبت کل کمبود (بندهای ۲ و ۴) در مراحل مختلف حل مسئله قابل‌تغییر درنظر گرفته شده‌اند.

فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی مسئله شامل تابع هدف و قیود را می‌توان در مجموعه رابطه‌های ۱ بیان کرد:

$$
\begin{aligned}
& Minimize\ (Cap) \\
& St: \\
& S_{t+1} = S_t + I_t - E_t - C_t - RK_t - RS_t \quad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& C_t = C_{1t} + C_{2t} \\
& \forall S_{\min} \leq S_t \leq Cap \qquad t = 1, 2, ..., T \\
& RS_t \geq Re \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& RK_t \geq Z_t \times demk_t \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& RK_t \leq demk_t \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& RK_t \geq 0.25 \times demk_t \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& Area_t = 0.07228 + 0.0495 \times S_t \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& E_t = he_t \times (Area_t + Area_{t+1})/2 \qquad \forall t = 1, 2, ..., T \\
& \mathrm{Re}\, l = \sum_{t=1}^{T} Z_t / \sum_{t=1}^{T} t \geq \alpha \\
& \sum_{t=1}^{T} (demk_t - RK_t) / \sum_{t=1}^{T} demk_t \leq \beta
\end{aligned} \tag{1}
$$

در رابطه‌های ۱، Cap حجم بیشینه‌ی مخزن (میلیون مترمکعب)؛ C_{1t} نیاز آبی شهر ۱ در ماه t (میلیون مترمکعب)؛ C_{2t} نیاز آبی شهر ۲ در ماه t (میلیون مترمکعب)؛ $S_{\min}$ کمینه‌ی حجم مجاز مخزن (میلیون مترمکعب)؛ S_t حجم مخزن در ابتدای ماه t (میلیون مترمکعب)؛ I_t آورد رودخانه در طول ماه t (میلیون مترمکعب)؛ E_t حجم تبخیر در ماه t (میلیون مترمکعب)؛ $demk_t$ نیاز کشاورزی در ماه t (میلیون مترمکعب)؛ RK_t آب تخصیص داده‌شده به نیاز کشاورزی در ماه t (میلیون

مترمکعب)؛ RS_t آب خروجی مازاد بر تخصیص نیازهای شرب و کشاورزی در ماه t (میلیون مترمکعب)؛ Rel اعتمادپذیری تأمین نیازکشاورزی؛ Z_t متغیر صفر و یک:

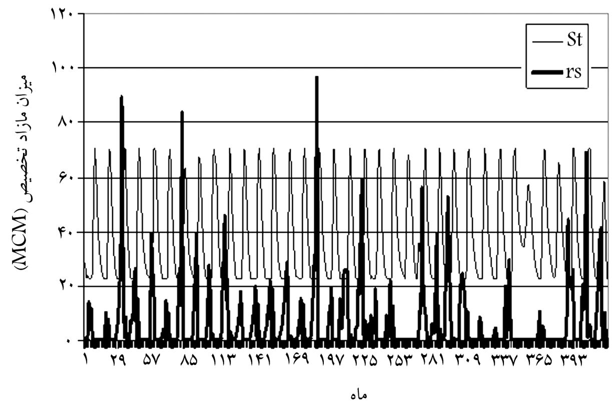
$$Z_t = \begin{cases} ۱ & \text{اگر نیازکشاورزی در ماه t به‌طورکامل تأمین شود} \\ ۰ & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

t شمارنده‌ی ماه؛ α سطح مطلوب اعتمادپذیری تأمین نیاز کشاورزی؛ T تعداد کل ماه‌ها؛ β بیشینه‌ی متوسط کمبود مجاز در تأمین نیازکشاورزی؛ he_t ارتفاع تبخیر از دریاچه‌ی سد در طول ماه t؛ $Area_t$ مساحت دریاچه‌ی مخزن در ابتدای ماه t؛ Re کمینه‌ی جریان زیست‌محیطی برابر با $۰/۱۲۱(\frac{m^۳}{S}) \times ۶۰ \times ۶۰ \times ۲۴ \times ۳۰ = ۰/۳۱۹(MCM)$ که در تمام ماه‌ها باید تأمین شود: در مدل مذکور تبخیر در هر ماه براساس میانگین سطح دریاچه‌ی مخزن و استفاده از رابطه‌ی میان حجم و سطح مخزن برآورد می‌شود. این تذکر لازم است که قید آخر نقش محدودکننده در فضای شدنی مسئله را دارد. در واقع با تغییر نسبت کل کمبود می‌توان اندازه‌ی فضای جواب را تغییر داد. این قید در طراحی واقعی سیستم آب‌رسانی، به نوعی کنترل‌کننده‌ی میزان کل آب تخصیصی در مواقع کمبود است. با حذف این قید، مدل مذکور برای کم‌کردن حجم بهینه‌ی سد در مواقع کمبود فقط به کمینه‌ی تخصیص یعنی مقدار صفر اکتفا خواهد کرد، در حالی‌که این موضوع هدف اصلی در طراحی نیست.

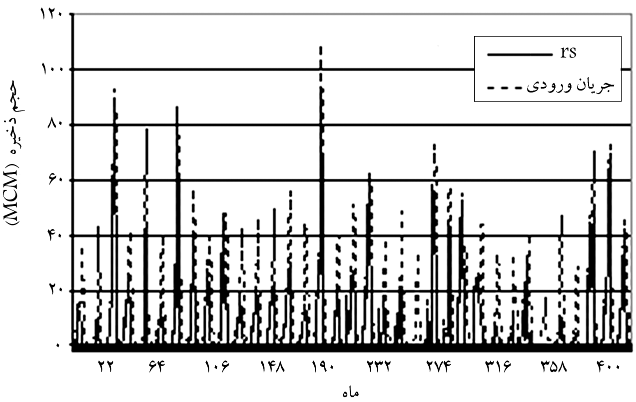
همان‌طورکه مشاهده می‌شود، مدل حاصل یک مدل MILP است. با توجه به ۳۵ سال آمار تاریخی موجود از آب‌دهی ماهانه ($T = ۴۲۰$) مدل مذکور شامل ۴۲۱ مجهول S_t، $۱۲۶۰ = ۴۲۰ \times ۳$ متغیرهای E_t، RK_t، RS_t و ۱ متغیر Cap مجموعاً ۱۶۸۲ متغیر عدد حقیقی، ۴۲۰ متغیر دو مقداره‌ی Z_t، ۴۲۰ معادله و $۲۵۲۲ = ۲ + ۴۲۰ \times ۶$ نامعادله به غیر از قیود مثبت‌بودن متغیرهاست. این مسئله با تعداد فوق از مقادیر متغیرهای حقیقی، متغیرهای عدد صحیح و معادلات و نامعادلات یک مسئله‌ی متوسط‌مقیاس و تا حدی بزرگ‌مقیاس خصوصاً از نظر تعداد متغیرهای دو مقداره است. در صورت عدم وجود متغیرهای دو مقداره‌ی Z_t، حل مسئله‌ی خطی مذکور با روش سیمپلکس به‌راحتی و بسیار سریع ممکن است. لیکن زمان حل مسئله با وجود همین تعداد از متغیرهای صفر و یک، با استفاده از روش‌های کلاسیک نظیر شاخه و حد قابل‌توجه است. بنابراین مدل فوق می‌تواند مثالی معقول برای ارزیابی روش‌های مورد استفاده در این تحقیق باشد.

حل مسئله با روش الگوریتم شاخه و حد (Branch & Bound)

برای حل مدل MILP مذکور، از یک نرم‌افزار شناخته‌شده در زمینهٔ حل مسائل بهینه‌سازی (LINGO۹/۰) استفاده شده است. این نرم‌افزار برای حل یک مدل MILP، از روش شاخه و حد استفاده می‌کند. زمانی‌که تعداد متغیرهای صحیح زیاد باشد، زمان حل با این الگوریتم به میزان قابل‌ملاحظه‌یی افزایش می‌یابد. برای نمونه در حالت اعتمادپذیری ۹۰٪ و با نسبت کمبودهای ۵٪ و ۱۰٪ بنابر اجراهای رایانه‌یی اخذشده با استفاده از یک رایانه Pentium۴ و CPU ۲/۴، زمان حل با وجود راه‌یافتن سریع الگوریتم به داخل فضای شدنی، بسیار زیاد بوده است. در این شرایط جواب‌های LINGO۹/۰ نیزکنترل شد. ظرفیت بهینه‌ی مخزن با اجرای مدل MILP برای اعتمادپذیری ۸۰٪ و میزان کمبود ۵٪ پس از ۷۷۰ تکرار برابر ۷۶/۹ میلیون متر مکعب و برای میزان کمبود ۱۰٪ پس از ۱۳۴۳ تکرار برابر ۷۰/۵۸



شکل ۲. نمودار میزان مازاد تخصیص ($\mathbf{RS}_t$) در مقابل حجم مخزن ($\mathbf{S}_t$) در روش شاخه و حد.



شکل ۳. نمودار میزان حجم مخزن ($\mathbf{S}_t$) در مقابل جریان ورودی مخزن در روش شاخه و حد.

میلیون مترمکعب نتیجه شد. شکل ۲ تغییرات حجم آب مازاد در برابر تغییرات حجم ذخیره‌ی مخزن و شکل ۳ تغییرات جریان ورودی به مخزن و حجم ذخیره‌ی مخزن را که از روش شاخه و حد به‌دست آمده‌است، نشان می‌دهد.

حل مدل با استفاده از الگوریتم GA

در این بخش مدل MILP مذکور با استفاده از GA حل شده است. متغیرهای تصمیم مدل GA میزان آب تخصیص‌یافته به نیازکشاورزی (RK_t) و جریان مازاد بر تخصیص به نیازهای کشاورزی و شرب (RS_t) در هر ماه درنظر گرفته شده‌اند. این تذکر لازم است که با معلوم‌بودن جریان خروجی کل و کسر کمینه‌ی جریان زیست‌محیطی و نیازهای شرب از آن، مقدار باقیمانده لزوماً برابر آب تخصیص‌یافته به نیازکشاورزی (RK_t) نیست. این مقدار شامل بخشی از متغیر جریان مازاد (RS_t) نیز می‌تواند باشد که مقادیر آن در مقدار ظرفیت مخزن سد مؤثر است. بنابراین بایستی سهم تخصیص به نیازکشاورزی (RK_t) و مازاد آن (RS_t) در جریان خروجی کل به شکل جدا و تفکیک‌شده در مدل GA لحاظ شود. با معلوم‌بودن این متغیرها، متغیرهای دیگر مسئله نظیر مقادیر متغیرهای S_t و Z_t قابل محاسبه خواهند بود.

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که انتخاب ۲ نوع متغیر فوق در مقایسه با انتخاب مثلاً متغیرهای S_t و RS_t ارجحیت دارد. علت این امر امکان استفاده از خصوصیات مسئله در انتخاب محدوده‌ی تغییرات مناسب و حتی‌الامکان کوچک‌تر

برای متغیرهای GA است. متغیر $S_۱$ نیز با اضافه‌کردن یک ژن به کروموزوم مربوطه جستجو می‌شود. بدین ترتیب هر کروموزوم دارای ۸۴۱ ژن خواهد بود که ۴۲۰ ژن اول شامل میزان آب ماهانه‌ی تخصیصی به نیاز کشاورزی در طول دوره‌ی ۳۵ ساله (RK_t) و ۴۲۰ ژن دوم شامل مقدار آب مازاد بر نیازهای مصرفی در هر ماه (RS_t) و یک ژن باقیمانده شامل حجم اولیه‌ی مخزن است. قیود مسئله به غیر از کران‌های بالا و پایین متغیرها شامل معادله‌ی پیوستگی، قید اعتمادپذیری و قید بیشینه‌ی کمبود است. قیود بیشینه‌ی کمبود و اعتمادپذیری مدل GA با اعمال مکانیسم جریمه در تابع هدف ارضاء می‌شوند. بنابراین یکی از مسائل مهم در این مدل تعیین ضرایب جریمه‌ی مناسب است. مسئله با یک جمعیت اولیه متشکل از کروموزوم‌هایی که فقط ژن‌های RK_t و RS_t در فاصله‌ی مجاز خود به شکل رابطه‌های ۲ و ۳ انتخاب شده‌اند، حل شد:

$$۰/۲۵ \times demk_t \leq RK_t \leq demk_t \qquad (۲)$$

$$۰/۳۱۹ \leq RS_t \leq ۱۲۰ \qquad (۳)$$

لازم به ذکر است که مقدار کمینه‌ی ۰٫۳۱۹، همان کمینه‌ی جریان زیست‌محیطی است که بایستی در تمام ماه‌ها تأمین شود. مقدار اولیه‌ی $S_۱$ نیز حجم کمینه‌ی مخزن اختیار شد.

قیود مسئله شامل: ۱) رابطه‌ی پیوستگی؛ ۲) قید کمینه‌ی اعتمادپذیری و ۳) قید بیشینه‌ی کمبود متوسط به‌ترتیب از طریق شبیه‌سازی رابطه‌ی پیوستگی و اعمال جریمه به شکل زیر در تابع هدف منظور شده‌اند:

۱. برای ارضاء معادله‌ی پیوستگی با تولید متغیر ذخیره‌ی اولیه ($S_۱$) و نیز متغیرهای RK_t و RS_t در GA مقدار حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای هر ماه در درون مدل به شکل رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه است:

$$S_{t+۱} = S_t + I_t - C_t - RK_t - RS_t - E_t \qquad (۴)$$

متغیرهای رابطه‌ی ۴ قبلاً تعریف شده‌اند. در معادله‌ی ۴ با جای‌گذاری رابطه‌ی خطی عبارت تبخیر (E_t) بر حسب S_t و $S_{t+۱}$، فقط متغیر مجهول معادله یعنی $S_{t+۱}$ قابل‌محاسبه خواهد بود. در رابطه‌ی ۴ در صورت قرارنگرفتن حجم ذخیره‌ی مخزن در محدوده‌ی مجاز، مقدار حجم مخزن در انتهای ماه و متناسب با جریان تخصیص‌یافته به نیاز کشاورزی اصلاح می‌شود؛

۲. جریمه‌ی قید کمینه‌ی اعتمادپذیری به‌صورت رابطه‌ی ۵ اعمال شد:

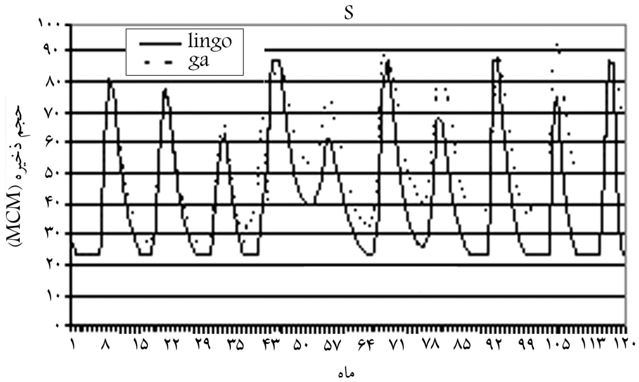
$$Rel\ Penalty = \alpha \times T - \sum_{t=۱}^{t} Z_t \quad if\ Rel < \alpha \qquad (۵)$$

۳. جریمه‌ی مربوط به بیشینه‌ی کمبود مجاز نیز در صورت مثبت‌بودن مقدار جریمه به‌صورت رابطه‌ی ۶ اعمال شده است:

$$Lack\ Penalty = \frac{\sum demk_t - \sum RK_t}{\sum demk_t} - \beta \qquad (۶)$$

با درنظرگرفتن ۷۵٪ کروموزوم‌ها برای اعمال عملگر تبادل به‌صورت تک‌نقطه‌یی و ۲۵٪ برای اعمال عملگر جهش با گذشتن بیش از ۱۰۰۰ نسل که هر نسل شامل ۸۰ کروموزوم بود، موفقیت چندانی حاصل نشد و الگوریتم قادر نبود بیش از چند درصد، میزان تابع هدف مسئله را بهبود دهد.

شایان ذکر است که این مدل با طول کروموزوم‌های کوتاه‌تر برای دوره‌های ۳، ۵ و ۱۰ ساله با سرعت مطلوبی به جواب می‌رسد (شکل ۴) و در برخی موارد جواب‌هایی کمی بهتر از روش شاخه و حد ارائه می‌کند.



شکل ۴. مقایسه‌ی میزان حجم ذخیره‌ی ماهانه‌ی سیستم در روش GA و روش شاخه و حد در دوره‌ی ۱۰ ساله.

اصولاً در مسائل با تعداد متغیرهای زیاد و در نتیجه طول رشته‌های طولانی و خصوصاً متغیرهای به‌هم‌مرتبط که سبب می‌شود فضای موجه مسئله، بخش بسیار کوچکی از فضای بسیار بزرگ آن را شامل شود، تولید جواب‌های اولیه که در آن کمینه‌ی تعدادی جواب موجه وجود داشته باشد، یک مشکل شناخته‌شده در مدل‌های GA است. در این‌گونه مسائل تولید یک مجموعه رشته‌ی اولیه شامل تعدادی جواب‌های موجه نیازمند تمهیدات خاصی است. همچنین تنظیم پارامترهای مدل GA و خصوصاً ضرایب جریمه در این نوع مدل‌ها با توجه به تعداد زیاد محدودیت‌ها بسیار مهم است و می‌تواند مستلزم استفاده از ظرافت‌های وابسته به هر مسئله‌ی خاص باشد.

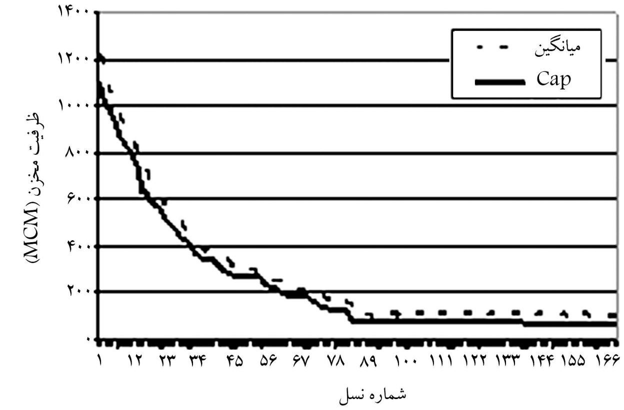
مدل GA-LP

برای حل یک مدل MILP می‌توان قسمت اعداد صحیح را از برنامه‌ریزی خطی جدا کرد و با یک الگوریتم تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک سعی در تولید متغیرهای عدد صحیح و تکامل آن داشته باشیم. باقیمانده‌ی مدل یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی است که به‌راحتی و با سرعت قابل‌قبول با الگوریتم‌های حل LP نظیر سیمپلکس[8] یا روش نقاط داخلی[9] حل‌شدنی است. بنابراین در مدل GA-LP پیشنهادی، مقادیر متغیرهای Z_t در جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند. ضمناً با توجه به دومقداره‌بودن این متغیرها روش کدگذاری مستقیماً و بدون نیاز به کدگشایی[10] قابل استفاده است. به بیان دیگر هر کروموزوم یا رشته[11] در مدل GA یک رشته‌ی ۴۲۰ بیتی خواهد بود که هر بیت نماینده‌ی یکی از متغیرهای Z_t است که مقدار آن برابر صفر یا یک خواهد بود. البته واضح است که کنترل قید اعتمادپذیری در مدل GA بایستی از طریق راهکار اعمال جریمه همراه با استفاده از ضریب جریمه‌ی مناسب به مدل و در تکرارهای مختلف برآورده شود.

برنامه‌نویسی این مدل در محیط نرم‌افزار Matlab۷ انجام و مدل GA-LP پس از توسعه، در شرایط مختلف آزمایش و نتایج آن ارائه شده است.

جمعیت اولیه‌ی کاملاً تصادفی و ضریب جریمه‌ی متحرک

در شرایطی که جمعیت اولیه‌ی متشکل از صفر و یک‌های تصادفی و بدون هیچ‌گونه آرایش خاصی برای مدل GA درنظر گرفته می‌شود، با وجود یک ضریب جریمه‌ی



شکل ۵. هم‌گرایی با جمعیت اولیه‌ی تصادفی در مدل GA-LP و ضریب جریمه‌ی متحرک.

متحرک برای رسیدن به کمینه‌ی اعتمادپذیری مطابق رابطه‌ی ۷، پیشروی الگوریتم به سمت جواب بهینه به‌کُندی صورت می‌گیرد و الگوریتم به‌آرامی راه خود را به داخل فضای جواب پیدا می‌کند (شکل ۵).

$$Penalty = Alfa \times |\sum Z_t - Rel \times T| \qquad (۷)$$

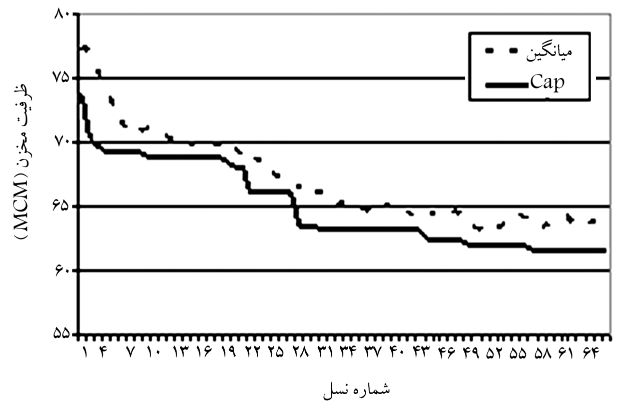
در رابطه‌ی ۷، ضریب $Alfa$ به شکل دینامیک در تکرارهای مختلف تنظیم شده است. پارامترهای ماجول GA شامل تعداد جمعیت برابر ۵۰، تعداد کروموزوم‌های نخبه برابر ۵، احتمال تبادل ۷۵٪، نرخ جهش متغیر با توجه به نسبت نسل حاضر به بیشینه‌ی تعداد نسل بوده است. الگوریتم در حالت اعتمادپذیری ۸۰٪ و کمبود ۱۰٪ پس از گذشت ۱۶۶ نسل معادل ۸۳۰۰ ارزیابی تابع هدف به عدد ۷۰٫۵۹۲۱ برای حجم بهینه‌ی مخزن هم‌گرا شد. بنابراین مدل توانسته است با ارضاء قید اعتمادپذیری مدل، ظرفیت بهینه‌ی مخزن را در حد قابل‌قبولی محاسبه کند که این مقدار در برابر تعداد تلاش‌های LINGO در همین حالت (۱۳۴۳ تکرار)، بسیار بیشتر است.

جمعیت اولیه‌ی تصادفی حاوی جواب شدنی با ضریب جریمه‌ی متحرک و ثابت

در این حالت جمعیت اولیه شامل صفر و یک‌های تصادفی به شکلی تولید می‌شود که دست‌کم یک یا چند جواب شدنی در جمعیت موجود باشد. برای تولید این جمعیت ابتدا ۴۲۰ صفر و یک به‌صورت تصادفی برای هر کروموزوم تولید و سپس کنترل می‌شود که تعداد ژن‌های هر کروموزوم که عدد ۱ به آن‌ها منصوب می‌شود، قید اعتمادپذیری مدل را ـصرف‌نظر از اینکه کدام ژن صفر یا یک باشد ـارضاء کند. مثلاً در حالتی‌که اعتمادپذیری مدل ۸۰٪ باشد، ۸۰٪ ژن‌های هر کروموزوم در جمعیت اولیه و یا تعدادی نزدیک به آن (۷۵٪ تا ۸۵٪) به‌صورت تصادفی عدد ۱ اختیار کنند و بقیه صفر باشند.

در حالت فوق و برای اعتمادپذیری ۸۰٪ و میزان کمبود ۱۰٪ الگوریتم با سرعت مطلوب و بعد از ۱۴ نسل (۷۰۰ ارزیابی تابع هدف) به عدد ۷۰٫۵۸ دست یافت. همان‌طورکه پیشتر ذکر شد روش شاخه و حد در LINGO برای این سطوح اعتمادپذیری و کمبود، پس از ۱۳۴۳ تکرار به جواب ۷۰٫۵۸ رسیده بود درنتیجه روش GA-LP عملکرد مطلوب‌تری داشته است.

با تغییر سطح اعتمادپذیری از ۸۰٪ به ۹۰٪ و میزان کمبود از ۱۰٪ به ۵۰٪ یعنی همان حالتی که LINGO در این شرایط پس از حدود ۵۰۰۰ تکرار به جواب ۶۵٫۸ و بعد از حدود ۷۰۰۰ تکرار به عدد ۶۴٫۸ هم‌گرا می‌شود، ولی در نهایت پس از شش میلیون تکرار (در حدود ۷ ساعت زمان اجرا) به جواب بهینه‌ی سراسری[۱۲] دست نمی‌یابد، GA-LP مجدداً عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. با استفاده از یک جمعیت اولیه‌ی انتخابی شامل ۵۰ کروموزوم، همان‌طورکه در شکل ۶ مشخص است، پس از گذشت ۴۹ نسل (۲۴۵۰ ارزیابی تابع هدف) GA-LP به جواب ظرفیت مخزن برابر با ۶۳٫۴۷ میلیون مترمکعب هم‌گرا شد. با این تذکر که شرایط حل مسئله‌ی فوق از نظر پارامترهایی چون تعداد تبادل و جهش مانند قبل است، اینکه آیا جواب حاصل یک جواب شدنی و موجه است کنترل شد.

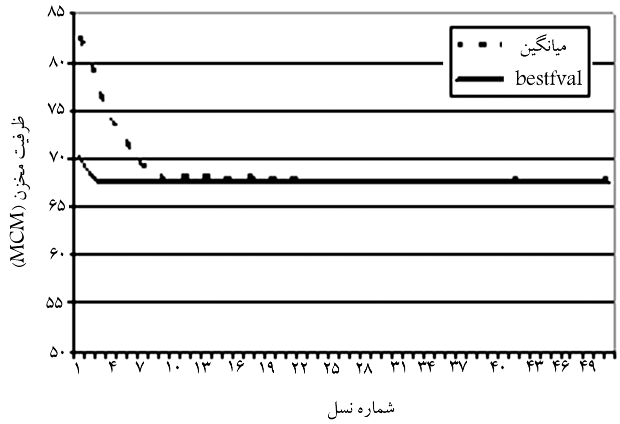


شکل ۶. هم‌گرایی با جمعیت اولیه حاوی جواب‌های شدنی در مدل GA-LP.

گرچه استفاده از ضریب جریمه برای تأمین اعتمادپذیری ضروری بوده است، الگوریتم GA-LP هم در شرایط استفاده از ضریب جریمه‌ی ثابت و هم متغیر به جواب‌های بسیار نزدیک به هم منتهی شد.

جمعیت اولیه‌ی هدایت‌شده و ضریب جریمه‌ی متحرک

در این روش جمعیت اولیه براساس یک منطق برگرفته‌شده از شرایط واقعی مسئله و نه به‌صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شود. براساس شناخت طبیعت مسئله منطقی است فرض شود که مدل در ماه‌هایی که نیاز آبی کمتر از میانگین سالانه باشد، نیاز را کاملاً تأمین کند، یعنی به ژن مربوط به آن ماه ارزش ۱ داده شود و در ماه‌هایی که نیاز بیشتر از میانگین سالانه است، فقط کمینه‌ی موردقبول مدل تأمین شود (ژن مربوط به آن ماه ارزش صفر اختیارکند). بر این اساس جمعیت اولیه ایجاد و سپس با تغییر مقدار چند ژن به‌صورت تصادفی برای رسیدن به‌میزان اعتمادپذیری موردنظر، الگوریتم اجرا می‌شود. این بدان معنی است که جمعیت اولیه یک اطمینان‌پذیری اولیه را به سیستم القا می‌کند. همچنین با انتخاب ضریب جریمه از تأمین شرط اعتمادپذیری اطمینان حاصل می‌شود. این تذکر لازم است که پارامترهای مدل GA-LP نیز در این شرایط همان پارامترهای قبلی انتخاب شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در این شرایط الگوریتم با سرعت زیادی به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند و حتی در بعضی مواقع در همان نسل اول به جواب ۶۷٫۵۰۱۵۳ میلیون مترمکعب می‌رسد. دلیل این امر آن است که با انتخاب جمعیت اولیه به‌صورت فوق‌الذکر، احتمال وجود جواب اصلی در آن و یا جوابی نزدیک به جواب اصلی بسیار زیاد است. بنابراین اگر دسته‌ی کروموزوم انتخابی شامل جواب اصلی باشد که مسئله حل شده است، در غیر این‌صورت به‌دلیل تعدد جواب‌های نزدیک به جواب اصلی، هم‌گرایی به سرعت و در زمان بسیار اندکی انجام می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷. مقایسه‌ی همگرایی متوسط نسل و همگرایی بهترین جواب نسل با جمعیت اولیه‌ی هدایت‌شده در مدل GA-LP.

نکته‌ی قابل توجه اینکه در حالت اعتمادپذیری ۹۰٪ و کمبود ۱۵٪ نرم‌افزار LINGO در این مسئله قادر به ارائه‌ی جواب نبوده است. در ادامه با قراردادن جواب مدل به‌منزله‌ی جواب اولیه در LINGO جواب ۶۷٫۳۲ میلیون مترمکعب نتیجه شد. علی‌رغم آن مقایسه‌ی سرعت الگوریتم‌های شاخه و حد و GA-LP در حالتی که هر دو الگوریتم به جواب رسیده‌اند (اطمینان‌پذیری ۸۰٪ وکمبود ۱۵٪) از طریق مقایسه‌ی تعداد ارزیابی‌های تابع هدف (تعداد LPهای حل‌شده) نشان می‌دهد که GA-LP بسیار سریع‌تر از روش کلاسیک شاخه و حد به جواب رسیده است.

تحلیل مسئله در شرایط اعمال کنترل بر اعتمادپذیری تأمین نیاز شرب علاوه‌بر نیازهای کشاورزی

یکی از عوامل مهم و اساسی در افزایش تلاش‌های محاسباتی یک مدل MILP تعداد متغیرهای گسسته و یا دومقداره در مدل است. در این راستا و با هدف آزمایش روش‌های پیشنهادی در شرایطی که در مدل MILP تعداد متغیرهای دومقداره بیشتر شده است و درنتیجه بر پیچیدگی آن افزوده می‌شود، اعمال کنترل بر اعتمادپذیری قید تأمین نیازهای شرب نیز در دستورکار قرارگرفت. در مدل قبلی تأمین نیازهای شرب با اعتمادپذیری ۱۰۰٪ مدنظر بود و بنابراین در قیود مربوط نیازی به استفاده از متغیرهای دومقداره نبوده است. در مدل جدید برای اعمال کنترل بر میزان اعتمادپذیری تأمین نیازهای شرب، تعداد متغیرهای دومقداره ۲ برابر خواهد شد و در نتیجه حل آن نیز دشوارتر می‌شود. لذا فرمول‌بندی مدل در شرایط جدید و در قالب روابط زیر، تغییر می‌کند:

$$Minimize(Cap)$$
$$S.t.$$
$$S_{t+۱} = S_t + f_t - E_t - RC_t - RK_t - RS_t$$
$$C_t = C_{۱t} + C_{۲t}$$
$$S_{\min} \leq S_t < C_{۲t}$$
$$RS_t \geq Re$$
$$RK_t \geq Z_t \times demk_t$$
$$RK_t \leq demk_t$$
$$RK_t \geq ۰٫۲۵ \times demk_t$$
$$RC_t \geq C_t \times ZZ_t$$
$$RC_t \leq C_t$$
$$RC_t \geq \alpha \times C_t$$
$$\sum_{t=۱}^{T} Z_t / \sum_{t=۱}^{T} t \geq \alpha$$
$$\sum_{t=۱}^{T} (demk_t - RK_t) / \sum_{t=۱}^{T} demk_t \leq \beta$$
$$\sum_{t=۱}^{T} ZZ_t / \sum_{t=۱}^{T} t \geq\geq \alpha' \quad \text{(اعتماد پذیری نیاز شهری)}$$
$$\sum (C_t - RC_t) / \sum C_t \leq \beta' \quad \text{(کمبود نیاز شهری)}$$

در روابط بالا، C_t نیاز کل شهری در ماه t؛ RC_t حجم آب تخصیص یافته به نیاز شرب در ماه t؛ α' سطح اعتمادپذیری مطلوب برای تأمین شهری؛ β' بیشینه‌ی متوسط کمبود نیاز شهری؛ ZZ_t متغیرهای صفر و یک مربوط به تأمین یا عدم تأمین نیاز شهری.

روابط اضافه‌شده به مدل اولیه این امکان را به‌وجود می‌آورد تا نیاز شهری با اعتمادپذیری α' برآورده شود. در این مسئله بیشینه‌ی کمبود را برای هر دو نیاز کشاورزی و شرب برابر با ۵٪ و سطح اعتمادپذیری مطلوب نیاز شهری ۹۰٪ و برای نیاز کشاورزی ۸۰٪ درنظرگرفته شد. در این آزمایش علی‌رغم ۲ برابرشدن متغیرهای صفر و یک، LINGO قادر به حل مسئله بوده است و ظرفیت بهینه‌ی مخزن برابر با ۷۳٫۹۷ میلیون مترمکعب در تکرار ۱۰۵۸۸ به‌دست آمد. البته روش شاخه و حد در مثال‌های قبل نیز برای اطمینان‌پذیری ۸۰٪ از نیاز کشاورزی به‌جواب رسیده بوده است.

در ادامه، همین مسئله با استفاده از مدل GA-LP حل شد. طول هر رشته در مدل GA-LP به ۸۴۰ = ۲ × ۴۲۰ ژن افزایش یافته است. مدل در شرایطی که جمعیت اولیه‌ی تصادفی شامل یک یا چند جواب شدنی باشد، اجرا و الگوریتم پس از ۴۷ نسل به جوابی نزدیک به جواب LINGO یعنی عدد ۷۴٫۲۳ هم‌گرا شد. در شرایطی که جمعیت اولیه به‌صورت هوشمند و به شکل ذکرشده در مسئله‌ی قبل انتخاب شود (۸۰٪ متغیرهای مربوط به تخصیص کشاورزی و ۹۰٪ متغیرهای مربوط به تخصیص شهری ۱ باشند)، الگوریتم GA-LP با سرعت بسیار بیشتر و در کمتر از ۸ نسل (با اندازه‌ی جمعیت ۵۰) یعنی با حل ۴۵۰ (۴۵۰ = ۸ × ۴۵۰) مدل LP، به جواب ۷۴٫۵۴ هم‌گرا شد (که البته جواب LINGO کمی بهتر بوده است). همان‌طورکه ملاحظه می‌شود جواب به‌دست آمده با روش GA-LP با استفاده از جمعیت اولیه‌ی مذکور در بدترین شرایط حدود ۲۳ برابر سریع‌تر از LINGO است.

ضرایب جریمه‌ی به‌کار رفته در این روش برای حصول از رسیدن به کمینه‌ی اطمینان‌پذیری‌ها، در روابط زیر، نشان داده شده است:

$$Penalty_۱ = Alpha \times |Rel_c \times T - \sum ZZ_t| \quad (۸)$$
$$Penalty_۲ = Beta \times |Rel_k \times T - \sum Z_t| \quad (۹)$$
$$Penalty = Penalty_۱ + Penalty_۲ \quad (۱۰)$$

مجدداً حل این مسئله با درنظرگرفتن نسبت کمبود ۵۰٪ و اعتمادپذیری ۸۰٪ برای تأمین نیاز کشاورزی و نسبت کمبود ۵٪ و اعتمادپذیری ۹۰٪ برای تأمین مصرف

شهری بررسی شد. با شرایط جدید قیود مسئله آزادتر می‌شوند. ابتدا روش شاخه و حد با به‌کاربردن نرم‌افزار LINGO کنترل شد. در این آزمایش با حل بیش از ۹۰ میلیون مدل LP، فرآیند حل به اتمام نرسید و نرم‌افزار از ارائه‌ی جواب بهینه‌ی سراسری ناتوان بود. همچنین قراردادن جواب مدل در کمبود ۵٪، که می‌تواند یک جواب موجه برای این حالت نیز باشد، به‌منزله‌ی جواب اولیه‌ی LINGO تا تکرار ۱۰۰۰۰۰ بهبودی در جواب اولیه ایجاد نشد و فرآیند حل پس از آن متوقف شد.

الگوریتم GA-LP با جمعیت اولیه‌ی ۵۰تایی از کروموزوم‌هایی که ۸۰٪ ژن‌های مربوط به تأمین نیاز کشاورزی و ۹۰٪ ژن‌های مربوط به تأمین نیاز شهری در آن به‌طور تصادفی دارای ارزش ۱ و بقیه ارزش صفر داشتند، حل شد و الگوریتم پس از گذشت ۲۵۳ نسل یعنی با حل بیشینه‌ی ۱۲۶۵۰ مدل LP (۱۲۶۵۰ = ۵۰ × ۲۵۳) به جواب ۵۶٫۴۳ میلیون مترمکعب یعنی ظرفیت بهینه‌ی مخزن رسید. ضمناً بررسی مجدد جواب‌ها نشان داد که تمامی قیود مسئله برآورده شده‌اند.

نتیجه‌گیری

۱. الگوریتم GA-LP برای حل مسائل بهینه‌سازی آمیخته با اعداد صحیح در اکثر موارد سرعتی بیشتر از روش‌های GA و روش شاخه و حد داشته است. توانایی این الگوریتم ترکیبی به گونه‌یی است که حتی در شرایط تعمیم مسئله برای احتساب ۲ نوع قید اعتمادپذیری و ۲ نوع ضریب کمبود برای تخصیص آب کشاورزی و شهری به تفکیک و دو برابرشدن تعداد متغیرهای دومقداره باز هم کارآیی خود را حفظ می‌کند؛

۲. حل این مسئله با الگوریتم GA کمک چندانی به بهبود فرآیند حل نکرد و در اکثر موارد در رسیدن به جواب مسئله موفقیت ندارد. دلیل این امر طولانی‌بودن کروموزوم‌ها (۸۴۰ ژن) و بازه‌ی بزرگ اعداد مربوط به جریان‌های خروجی مازاد است که الگوریتم را دچار سردرگمی می‌کند و نتایج خوبی را به دست نمی‌دهد. علاوه‌بر آن، دشواری تعیین ضرایب جریمه‌ی مناسب برای الگوریتم و تولید جمعیت اولیه‌یی که کمینه‌ی یک یا چند جواب شدنی در آن وجود داشته باشد نیز از کارایی این روش در این‌گونه مسائل می‌کاهد. البته پُرواضح است که می‌توان با استفاده از روش‌های ابتکاری در تولید رشته‌های اولیه‌ی مطلوب و تعیین ضرایب جریمه‌ی خودتطبیقی، حل مسئله را با GA ممکن ساخت که با توجه به فرآیند موردنیاز و لزوم تحلیل حساسیت ضرایب همراه با تغییر شرایط مسئله، این کار دشوار و وقت‌گیر است؛

۳. برای هدایت الگوریتم‌های GA-LP و GA به داخل فضای شدنی، از راهکارهای ترمیم و جریمه به‌صورت جداگانه استفاده شد. راهکار ترمیم علاوه‌بر راهکار جریمه برای GA-LP قابل‌استفاده تشخیص داده شد، در حالی‌که برای الگوریتم GA با مشکل مواجه بوده است و استفاده از جریمه و ترمیم به‌صورت هم‌زمان با یکدیگر، بهتر از دو حالت قبل ارزیابی می‌شود. در هر صورت برای هر دو الگوریتم استفاده از راهکار جریمه برای هدایت آن در فضای شدنی مناسب است؛

۴. ضریب جریمه‌ی ثابت برای اعمال قید اعتمادپذیری در مدل GA-LP عملکردی به‌خوبی توابع جریمه‌ی خودتطبیقی دارد. دلیل آن‌را می‌توان این‌گونه توصیف کرد که ژن‌ها در کروموزوم جواب به‌صورت دومقداره (صفر و یک) هستند و قابلیت تغییری به جز این دو مقدار را ندارند. همچنین علاوه‌بر مقدار مجموع متناظر اعداد ژن‌های یک کروموزوم (که نشان‌دهنده‌ی عدد اعتمادپذیری است) ترتیب قرارگیری آن‌ها نیز در کروموزوم مربوط، مهم است. بر این اساس ارزش‌گذاری جواب‌های یک نسل با توجه به نزدیکی صرف به میزان اعتمادپذیری مدل، ایده‌ی خوبی نیست و ترجیح بر این است که تمام کروموزوم‌های خارج از فضای شدنی مسئله به یک مقدار ارزش‌گذاری شوند؛

۵. اگرچه الگوریتم GA-LP در حل مسئله‌ی مذکور از الگوریتم GA کارآمدتر است، ولی بایستی خاطرنشان کرد که هر بار ارزیابی تابع برازش در الگوریتم GA-LP به علت حل یک مدل LP چندین برابر این زمان در الگوریتم GA است. علی‌رغم آن به‌دلیل آنکه تعداد ارزیابی‌های موردنیاز در مدل GA بسیار بیشتر از مدل GA-LP خواهد بود، نهایتاً مدل GA-LP کارایی بیشتری در حل مسئله‌ی تحت مطالعه دارد؛

۶. عملکرد نهایی و مناسب الگوریتم GA علاوه‌بر تعداد متغیرها، تحت تأثیر بازه‌ی مجاز تغییرات آن‌ها نیز است. در نتیجه تلاش GA برای یافتن جواب‌های مسئله، تابعی از محدوده‌ی مجاز تغییرات متغیرها و تعداد آن‌ها است؛ به‌طوری‌که کاهش هر یک از آن‌ها مزیت استفاده از این روش را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛

۷. در خاتمه بایستی خاطرنشان کرد که بر اساس مسائل و مدل‌های محدوده‌ی بررسی‌شده در این مطالعه نمی‌توان حکم قطعی مبنی بر برتری راهکار مدل GA-LP بر الگوریتم‌های کلاسیک نظیر شاخه و حد داد. این موضوع نیازمند بررسی بیشتر و مطالعه‌ی جوانب دیگری است که بایستی در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

پانوشت

1. chance constraints
2. deterministic
3. binary
4. combinatorial
5. non-linear programming
6. hybrid
7. branch & bound
8. Simplex
9. interior points method
10. encoding
11. string
12. global optimum solution

منابع

1. Blum, C. and Roli, A. "Meta-heuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparision.",

ACM Computing Surveys, **35**(3), pp. 268-308 (2003).

2. Holland, J.H. "Adaptation in natural and artificial systems", *IT Press,* Cambridge, Mass. (1975).
3. Murphy, L.J.; Simpson, A.R. and Dandy G.C. "Design of a network using genetic algorithms", *Water,* **20**, pp. 40-42 (1993).
4. Mckinney, D.C. and Lin, M.D. "Genetic algorithm solution of groundwater management models", *Water Resources Research,* **30**(6), p. 1897-1906 (1994).
5. Oliveira, R. and Loucks, D.P. "Operating rules for multireservoir systems", *Water Resources Research,* **33**(4), pp. 839-852 (1997).
6. Cai, X.; Mckinney, D. and Lasdon, L. "Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach", *Advances in Water Resources,* **24**(6), pp. 667-676 (2001).
7. Shourian, M.; Mousavi, S.J.; Menhaj, M. and Jabbari, E. "Neural network-based simulation optimization model for optimal water allocation planning at basin scale", *J. of Hydroinformatics, IWA,* **10**(4), pp. 331-343 (2009).
8. DEZAB Consulting Engineers, "Second-stage studies of Cheragh Veis dam reservoir and Saghez sanitary water conveyance" (2003).