تخمین پارامترهای مدل پشتیبان تصمیم مدیریت حوضه آبریز MODSIM به کمک الگوریتم‌های فراکاوشی

ایمان سبززاده[۱]، سعید علیمحمدی[۲]، مجتبی شوریان[۳]

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران[۱]

استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)- تهران[۲]

مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران[۳]

imansabzzadeh@yahoo.com

چکیده

سیستم‌های منابع آب متشکل از بخش‌های مختلف و مستقل از هم مانند زیست‌محیطی، اجتماعی، هیدرولوژیکی و مدیریتی هستند. مدیریت و برنامه‌ریزی این منابع در سطح یک حوضه آبریز نیازمند سیستم‌های پشتیبان تصمیمی است که معرف همه جنبه‌های سیستم منابع آب باشند. MODSIM یک مدل پشتیبان تصمیم مدیریت حوضه آبریز است که در دانشگاه ایالتی کلرادو در سال ۱۹۷۹ توسعه داده شده است. این مدل قابلیت شبیه‌سازی خصوصیات مختلف حوضه آبریز را دارد. در این مطالعه پارامترهای (ضرایب بازگشتی جریان از نیازها) مدل MODSIM کالیبره شده‌اند. کالیبراسیون به کمک الگوریتم‌های فراکاوشی GA و PSO، به عنوان الگوریتم‌های بهینه‌ساز، انجام شده است. کد الگوریتم‌های GA و PSO (به زبان VB.Net) در محیط اجرای سفارشی MODSIM نوشته شد. به کمک این ویژگی MODSIM کالیبراسیون بدون استفاده از برنامه یا نرم‌افزار دیگری انجام گرفته است. از یک تابع هدف وزنی برای کالیبره کردن همزمان هیدروگراف جریان سطحی و هیدروگراف آب‌خوان استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد PSO تا حدودی بهتر از GA است؛ هرچند که مقدار ضرایب بازگشتی تقریباً برابر است.

کلمات کلیدی: *سیستم پشتیبان تصمیم، کالیبراسیون، الگوریتم فراکاوشی.*

مقدمه

رشد سریع فناوری‌های کامپیوتری سبب توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم (DSSs) مدیریت حوضه آبریز شده است. این سیستم‌ها برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب پیچیده را تسهیل می‌نمایند و ابزاری برای اجرای مدیریت جامع منابع آب هستند. مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی که در درون DSSها وجود دارند، مهمترین ابزار محققان و دست‌اندرکاران برای تحلیل رفتار و عملکرد هر طرح یا سیاست مدیریتی برای سیستم منابع آب هستند؛ قبل از اینکه این سیاست یا طرح بر روی سیستم واقعی اجرا شود [۱].

دقت مدل‌های شبیه‌ساز و آنچه که پیش‌بینی می‌کنند تا درجه خیلی زیادی به پارامترهای انتخاب شده برای آنها بستگی دارد. از طرف دیگر روابط و معادلاتی که مدل به کمک آنها فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه را مدلسازی و پیش‌بینی می‌کند برای شرایط خاص و تحت فرضیات ساده‌کننده‌ای به‌دست آمده‌اند. همه این عوامل ضرورت کالیبراسیون مدل‌های شبیه‌ساز حوضه آبریز را تشدید می‌کند. MODSIM یکی از مدل‌های شبیه‌ساز حوضه آبریز با رویکرد مدیریتی است که در دانشگاه ایالتی کلرادو توسعه داده شده است [۲]. در این تحقیق پارامترهای این مدل (ضرایب جریان برگشتی از مصرف کننده‌های حوضه آبریز) به کمک الگوریتم ژنتیک و الگوریتم دسته ذرات کالیبره شده است. این کار با کدنویسی به زبان Visual Basic در درون مدل MODSIM انجام شده است و کالیبره کردن آن را بی نیاز از هر مدل و نرم‌افزار دیگری کرده است.

کالیبراسیون مدل‌ها

کالیبراسیون یک مدل به فرآیند تطابق خروجی شبیه‌سازی شده با خروجی مشاهداتی به کمک تنظیم پارامترهای مدل، اطلاق می‌شود. پارامترهای مدل‌ها را به صورت دستی یا با استفاده از تکنیک‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تخمین می‌زنند. بر همین اساس نیز دو روش کالیبراسیون بوجود آمده است: کالیبراسیون دستی و خودکار. در کالیبراسیون خودکار مقادیر مناسب پارامترها بر اساس یک الگوریتم بهینه‌سازی به‌دست می‌آیند [۳]. در مقایسه با کالیبراسیون دستی، سرعت کالیبراسیون خودکار بیشتر است.

برای کالیبراسیون یا تخمین پارامترهای یک مدل باید سه مؤلفه اصلی را انتخاب کرد: نوع الگوریتم بهینه‌سازی، تابع هدف، و معیار همگرایی. در این مطالعه از الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA[1] و TPSO[2] به عنوان الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده است که در دسته الگوریتم‌های با قابلیت پیدا کردن نقطه بهینه مطلق قرار می‌گیرند (Sorooshian and Gupta, 1995). نمونه‌هایی از Scheerlinck *et. al.* (2009)، Gill *et. al.* (2006)، Chu and Chang (2009) مطالعاتی هستند که در زمینه کالیبراسیون مدل‌های مرتبط با منابع آب توسط PSO انجام شده‌اند. در مورد مطالعات انجام گرفته توسط GA نیز می‌توان به Yongtai Huang and Lei Liu (2010)، Jae Heon and Sung Ryong Ha (2010)، Bekele and Nicklow (2007) اشاره کرد. نتیجه‌ای که از مطالعات انجام گرفته توسط الگوریتم‌های جمعیتی- تکاملی به‌دست آمده این است که از روش‌های جستجوی چند- شروعه[3] کاراتر هستند [٤].

[1] Turbulent Particle Swarm Optimization
[2] Genetic Algorithm
[3] multi start

رایج‌ترین تابع هدف بکار رفته برای کالیبراسیون خودکار، تابع مجموع جذر خطای بین مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل است. در این مطالعه از تابع مجموع جذر میانگین مربع خطای بین جریان مشاهداتی و محاسباتی بی بعد شده[1] استفاده شده است و هدف حداقل کردن مقدار آن است. علت استفاده از این تابع متفاوت بودن ابعاد خروجی‌های مورد نظر (جریان و تراز) است.

مسئله مورد نظر در این تحقیق از نوع چندهدفه است. هیدروگراف مشاهداتی جریان سطحی و هیدروگراف واحد آب‌خوان دو تابع هدف هستند که به روش ضرایب وزنی به یک تابع تبدیل شده‌اند. رابطه (۲) این موضوع را به زبان ریاضی نشان می‌دهد.

$$f(\theta) = \sum_{i=1}^{n} w_i f_i(\theta) \qquad , \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \qquad (۱)$$

بردار پارامترهای مدل است که در این مقاله ضرایب جریان بازگشتی از نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی به همراه سهمی از این ضرایب که به آب سطحی می‌پیوندد، است. f_iها نیز توابع هدف مختلف‌اند که دراینجا تعداد آنها دو است؛ یکی مجموع جذر میانگین مربع خطای جریان سطحی مشاهداتی و محاسباتی و دیگری مجموع جذر میانگین مربع خطای هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی آب‌خوان. Wها ضرایب وزنی هستند و با توجه میزان برداشت از دو منبع سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیازها تعیین شده‌اند.

معرفی مدل MODSIM

MODSIM یک سیستم پشتیبان تصمیم جامع است که از سال ۱۹۷۹ [۵] توسط دانشگاه ایالتی کلرادو توسعه و ارتقا داده شده است. هم‌اکنون نسخه ۸/۱ آن به صورت رایگان از سایت اینترنتی دانشگاه ایالتی کلرادو قابل دریافت است. هدف از توسعه MODSIM معرفی یک ابزار توانمند بود که قادر باشد بهره‌برداری فیزیکی در حوضه آبریز و ساختارهای حاکم بر تخصیص و استفاده از آب را شبیه‌سازی کند.

مدل MODSIM تحت قالب Microsoft.NET است. کدهای MODSIM به زبان MS Visual C++ نوشته شده‌اند [۲] و محیط گرافیکی آن نیز با زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک تهیه شده است. به همین دلیل یکی از ویژگی‌های مهم و منحصر بفردی که توسعه‌دهندگان این مدل در آن گنجانده‌اند، قابلیت سفارشی‌سازی[2] مدل است. این کار با وارد کردن کد به زبان C#.Net یا VB.Net در صفحه‌ای که در یکی از منوهای آن تدارک دیده شده است، انجام می‌شود.

علی‌رغم قابلیت‌های زیاد MODSIM، این مدل قادر به کالیبراسیون خودکار مدل و یا تخمین پارامترهای مدل نیست. در این مطالعه از قابلیت سفارشی‌سازی یا اجرای سفارشی[3] MODSIM و زبان برنامه‌نویسی VB.Net برای بهینه کردن پارامترهای جریان برگشتی حوضه آبریز و تخمین آنها در این مدل در یک حوضه آبریز به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است.

[1] Dimensionless Root Mean Square Error
[2] Customizing
[3] Custom Run

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجوی تصادفی برای یافتن راه‌حل بهینه در مسائل بهینه‌سازی است. این روش توسط John Holland در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان توسعه داده شد و پس از وی توسط عده‌ای از دانشجویانش مثل Goldberg توسعه یافت [٦].

هر متغیر تصمیم در الگوریتم ژنتیک در قالب یک ژن نمایش داده می‌شود. هر کروموزوم، نشان‌دهنده ترکیبات مقادیر انتخاب شده برای متغیرهای مختلف تصمیم مسئله است.

مقداری که از تابع هدف به ازای هر کروموزوم به‌دست می‌آید، معیار مقایسه و انتخاب کروموزوم‌های برتر است. در فرآیند تکامل در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌های برتر انتخاب شده، نقش والدینی را ایفا می‌کنند که با اعمال عملگر تزویج بر آنها، کروموزوم‌های جدیدی با ترکیبی از خواص دو کروموزوم‌والد تولید می‌شوند. عملگر دیگری که در فرآیند تکامل در الگوریتم ژنتیک نقش‌آفرینی می‌کند، عملگر جهش است که به طور تصادفی مقادیر یک یا چند ژن در یک کروموزوم را تغییر می‌دهد. این عملگر جهت اجتناب از توقف در نقاط بهینه موضعی به کار می‌رود.

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات

این روش برگرفته از رفتار دسته‌های ماهیان و پرندگان است و در سال ۱۹۹۵ توسط Eberhart و Kennedy پیشنهاد شد. این الگوریتم با یک جمعیت اولیه شروع می‌شود. در PSO، هر عنصر از جمعیت دارای یک سرعت قابل تنظیم (تغییر مکان) که مطابق با آن در فضای جستجو به حرکت در می‌آید، است. علاوه بر این، هر عنصر دارای یک حافظه بوده که بهترین نقطه از فضای جستجو را که تا بحال دیده است، به خاطر می‌سپارد. در نتیجه، حرکت هر ذره یک شتاب نتیجه شده از جمع‌بندی جهت بهترین نقطه دیده شده تاکنون توسط خود ذره و جهت بهترین نقطه در یک همسایگی تعیین شده است [٧].

اگر فضای جستجو یک فضای D بعدی باشد، iامین ذره از گروه ذرات 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 مقداری که تاکنون به آن رسیده و موقعیت خود را داراست. این اطلاعات، حاصل مقایسه تلاش‌هایی است که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد. همچنین هر ذره بهترین جوابی را که تاکنون در کل گروه به‌دست آمده است، از مقایسه مقادیر بهینه ذرات مختلف می‌شناسد. سرعت و موقعیت جدید هر ذره به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$V_{id}^{n+1}=\chi(\omega V_{id}^{n}+c_1 r_1^n(pBest_{id}-X_{id}^{n})+c_2 r_2^n(gBest_{nd}-X_{id}^{n})) \quad (۲)$$

$$X_{id}^{n+1}=X_{id}^{n}+V_{id}^{n+1} \quad (۳)$$

که d=1,2,…,D، بعد که ذره در آن قرار دارد؛ i=1,2,…,N، ذره iام جمعیت که N برابر اندازه جمعیت است؛ r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک؛ n=1,2,… شمارنده تکرار نسل‌ها؛ ω: وزن اینرسی؛ c_1 و c_2 دو ثابت

مثبت به نام‌های ضرایب شناخت و اجتماعی؛χ : فاکتور انقباض که می‌تواند مانند ω برای محدود کردن سرعت به کار می‌رود.

یکی از مشکلات الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، گرفتار شدن الگوریتم در نقاط بهینه موضعی و یا بوجود آمدن شرایط همگرایی زودرس است. در این تحقیق از الگوریتم TPSO یا الگوریتم PSO مجهز به تکنیک آشفتگی[1] برای جلوگیری از همگرایی زودرس استفاده شده است. در این روش اگر بردار سرعت یک ذره جستجو کننده کمتر از یک مقدار آستانه حدی (v_c) شود، در این صورت مقدار جدیدی برای سرعت ذرات محاسبه می‌شود. بنابراین در الگوریتم PSO آشفته، سرعت ذره به کمک رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$v_{i,d}^{k+1} = \rho \cdot u(-1,1) \cdot v_{max} \qquad \text{if } v_{i,d}^{k+1} \geq v_c \qquad (٤)$$

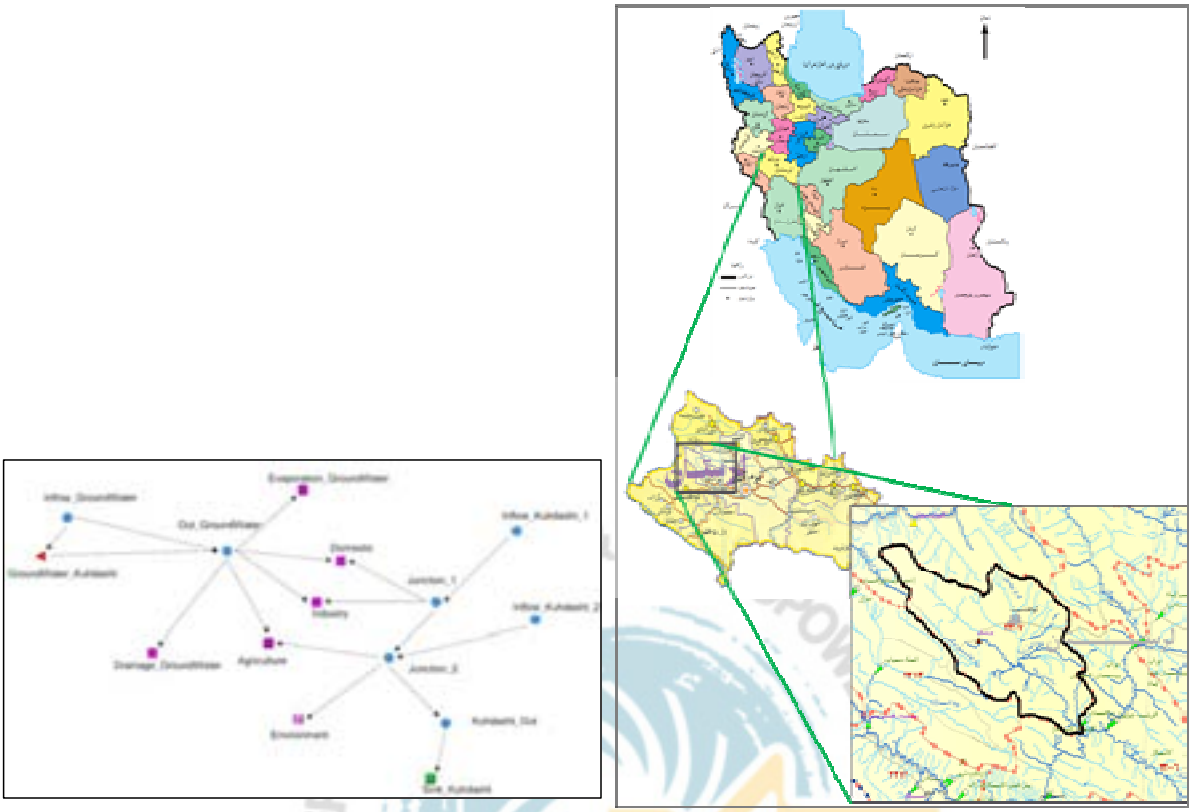
در این رابطه $u(-1,1)$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [-1,1] و ρ فاکتور مقیاس برای کنترل دامنه نوسانات ذرات با توجه به مقدار v_{max} است. v_c نیز همانگونه که ذکر شد، آستانه حدی سرعت بوده که یک پارامتر قابل تغییر و تطبیق برای محدودسازی کمترین مقدار سرعت ذرات است [۸].

مطالعه موردی

برای انجام کالیبراسیون مدل MODSIM ابتدا نیاز است یک حوضه آبریز در این نرم‌افزار مدلسازی شود. حوضه آبریز کوهدشت از زیرحوضه‌های حوضه آبریز کرخه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. علت انتخاب این زیرحوضه در دسترس بودن داده‌های هیدروگراف مشاهداتی جریان سطحی و هیدروگراف مشاهداتی آب‌خوان، مقادیر نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی زیرحوضه در طول سال و مشخصات آب‌خوان برای مدلسازی در MODSIM بود. شکل (۱) سمت راست، موقعیت این زیرحوضه را نشان می‌دهد. دوره شبیه‌سازی از سال آبی ۷۰-۱۳۷۱ تا ۸۶-۱۳۸۵ و به صورت ماهانه است. تعداد گام‌های زمانی ۱۹۲ زمانی (۱۶ سال) است. محدوده این زیرحوضه مطابق تقسیم‌بندی و نامگذاری نشریه شماره ۲۸۲- الف، دستورالعمل و ضوابط تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی در سطح کشور است.

1- Turbulent

شکل ۱: حوضه آبریز کوهدشت در استان لرستان (راست) و مدلسازی آن در MODSIM (چپ)



رابطه (۱) برای این زیرحوضه به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$f(0)=\frac{1}{192}\sum_{i=1}^{192}\left(0.79\times\sqrt{\frac{(Q_o^i-Q_c^i)^2}{Q_o^{i\,2}}}+0.21\times\sqrt{\frac{(H_o^i-H_c^i)^2}{H_o^{i\,2}}}\right)\quad ,\sum_{i=1}^{m}w_i=1 \qquad (۵)$$

ضرایب ۰/۷۹ و ۰/۲۱ بر مبنای میزان تأمین از منبع سطحی یا زیرزمینی تعیین شده‌اند. شکل (۱) سمت چپ، اجزای مدل زیرحوضه کوهدشت را در MODSIM نمایش می‌دهد. در این شکل چهار نیاز زیست‌محیطی، شرب، صنعت و کشاورزی تعریف شده است. اولویت تأمین نیازها به همان ترتیب گفته شده (زیست‌محیطی، شرب، صنعت و کشاورزی) است.

روش کار

ویژگی که MODSIM را از دیگر نرم‌افزارهای مدیریت حوضه آبریز متمایز ساخته است، قابلیت کدنویسی به زبان VB.Net یا C#.Net در درون آن است. توضیحات بیشتر در رابطه با این ویژگی مدل MIDSIM در بخش معرفی مدل آمده است. در این مقاله با برنامه‌نویسی الگوریتم‌های GA و TPSO به زبان VB.Net در درون MODSIM ضرایب جریان برگشتی کالیبره شدند. تعداد متغیرهای مسئله ٦ عدد بود: ضرایب جریان برگشتی از سه نیاز شرب، صنعت و

کشاورزی، و سهمی از این جریان برگشتی از نیازها، که به آب سطحی وارد می‌شود. این مقدار در GA برابر تعداد ژن‌های هر کرموزوم و در TPSO برابر بعد هر ذره است. لازم به توضیح است که با دانستن نسبت آب برگشتی به سطحی، مقدار آب برگشتی به آب زیرزمینی نیز مشخص می‌شود. دامنه متغیرها بین صفر و ۱ بود.

الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده در این تحقیق از نوع ساده است. به دلیل اینکه جواب‌های GA برای تابع هدف با تغییر پارامترهای آن تغییر می‌کرد، آنالیز حساسیت روی پارامترهای آن انجام شد و مقادیر نهایی حاصل از انجام آنالیز حساسیت در جدول (۱) آمده است. نرخ جهش ۰/٦ نرخ بالایی است. به دلیل گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی این نرخ جهش به‌دست آمد. با این کار الگوریتم را مجبور کرده‌ایم تا هر بار به میزان زیادی جستجو کند. در تمام تکرارهایی که GA انجام شد، جوابی بهتر از ۰/٤۲۵۸ تولید نکرد. نرخ انتخاب نیز نرخ نسبتاً بالایی است و این باز به ضعف جستجوی GA بر می‌گردد. این نرخ به این دلیل انتخاب شد تا GA مجبور شود هر بار درصد زیادی از فضای جستجوی قبلی را نیز بگردد. برای الگوریتم TPSO نیز مقادیر پارامترها در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. مقدار تابع هدف به‌دست آمده توسط TPSO برابر ۰/٤۲٤۷ به‌دست آمده است.

جدول ۱: پارامترهای الگوریتم PSO

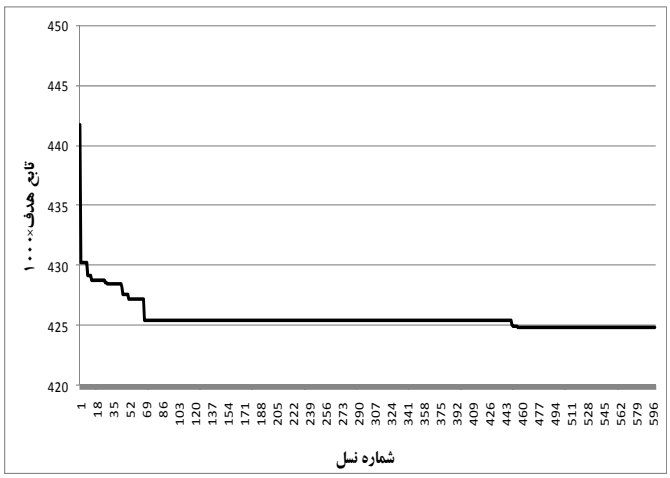
تعداد نسل	۱۰۰۰
تعداد جمعیت	۳۵۰
نرخ جهش	۰/٦
نرخ انتخاب یا تزویج	۰/۷
نوع عملگر انتخاب	چرخ رولت
نوع عملگر تزویج	دو نقطه ای

جدول ۲: پارامترهای الگوریتم GA

تعداد نسل	۱۰۰۰
تعداد جمعیت	۳۰۰
وزن اینرسی	۱
نرخ کاهش وزن اینرسی در هر تکرار	۰/۹۸
مقدار فاکتور مقیاس	۰/۰۷
نرخ افزایش فاکتور مقیاس در هر تکرار	۰/۹۹۵
پارامتر شناخت	۱
پارامتر اجتماعی	۳
سرعت ماکزیمم	۲
سرعت آستانه	۲

شکل (۲) روند همگرایی این دو الگوریتم را نشان می‌دهد. مقداری که TPSO برای تابع هدف به‌دست آورده کمتر از GA بوده است. به علاوه GA تقریباً در ۸۰ نسل اول نوساناتی داشته است و این به دلیل نرخ جهش بالای آن است. مقادیر ضرایب برگشتی حاصل از GA و TPSO در جدول (۳) آمده ست. شکل‌های (۳) و (٤) هیدروگراف‌های آب سطحی و هیدروگراف آب‌خوان را قبل و بعد از کالیبراسیون نشان می‌دهند. برای نیاز کشاورزی که حجم زیادی از نیاز آبی در زیرحوضه را به خود اختصاص داده است، دو الگوریتم ضرایب بازگشتی یکسانی را تولید کرده‌اند. به دلیل اینکه مقادیر جریان سطحی نسبت به مقادیر تراز آب‌خوان اعداد بسیار بزرگتری هستند، تفاوت PSO و GA در شکل (٤) به خوبی انعکاس نیافته است؛ اما شکل (۵) این تفاوت را نشان می‌دهد. به علاوه مقدار تابع هدف دو الگوریتم برای آب سطحی یکی است؛ فقط PSO برای آب زیرزمینی تابع هدف کمتری به‌دست آورده است.

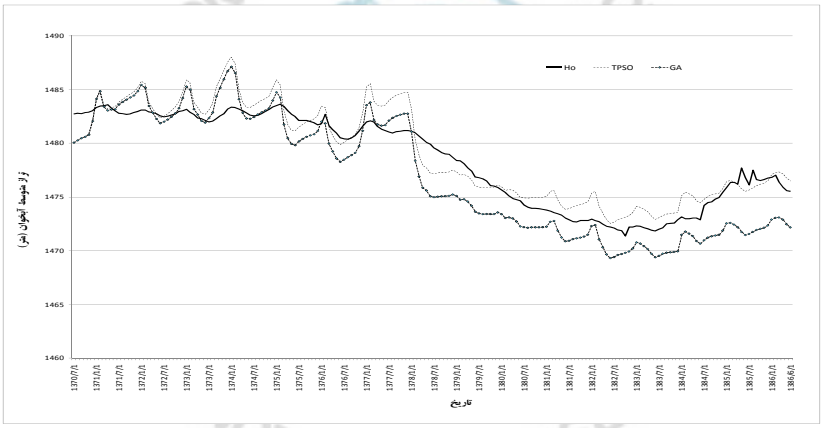
شکل ۲: روند همگرایی تابع هدف در GA و TPSO



جدول ۳: نتایج GA و TPSO برای ضرایب برگشتی

پارامتر	نوع الگوریتم	
	GA	TPSO
ضریب بازگشتی نیاز شرب	۲۰/٦	۹۰/٤
ضریب بازگشتی نیاز صنعت	۹۲	۹۵/٤
ضریب بازگشتی نیاز کشاورزی	۱۲/۷	۱۲/۷
سهم جریان برگشتی به آب سطحی نیاز شرب	۲	۰
سهم جریان برگشتی به آب سطحی نیاز صنعت	٦۹/۸	٦۲/٦
سهم جریان برگشتی به آب سطحی نیاز کشاورزی	۰	۰/۱

شکل ۳: هیدروگراف کالیبره شده آب‌خوان با استفاده از GA و TPSO

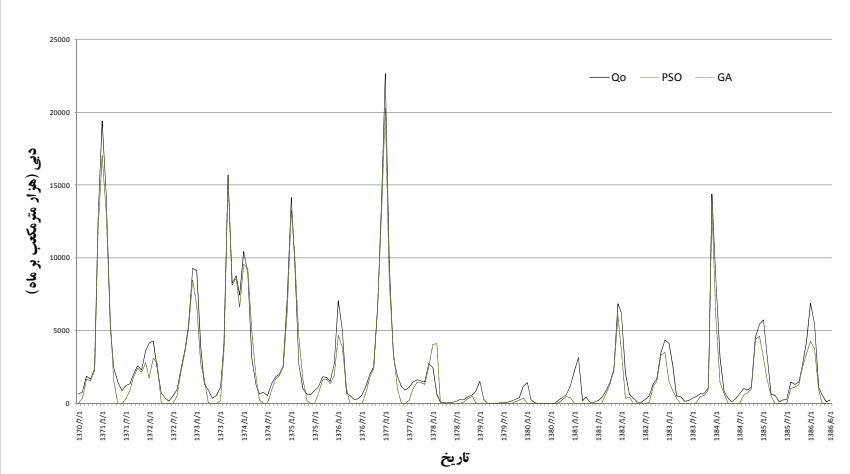


نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضرایب بازگشتی جریان از نیازهای یک حوضه آبریز در مدل MODSIM به کمک الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات کالیبره شد. هدف حداقل کردن مجموع جذر میانگین مربع خطای جریان سطحی مشاهداتی و محاسباتی در خروجی حوضه و مجموع جذر میانگین مربع خطای تراز مشاهداتی و محاسباتی آب‌خوان بود. این دو الگوریتم برای ضرایب بازگشتی سه نیاز شرب، صنعت و کشاورزی در زیر حوضه کوهدشت در غرب ایران، مقادیر تقریباً یکسانی را تولید کردند. به جز نیاز شرب که به دلیل اینکه این نیاز نسبت به نیاز کشاورزی حجم کمتری از منابع آبی زیرحوضه را به اختصاص داده است، قابل چشم‌پوشی است. مطابق نمودارهای شکل (۳) و (٤) الگوریتم PSO کالیبراسیون را بهتر انجام داده است و مقدار تابع هدف نهایی این الگوریتم نیز کمتر از GA است. تفاوت دو الگوریتم بیشتر به کالیبره کردن هیدروگراف آب زیرزمینی بر می‌گردد. ضریب بازگشتی نیاز کشاورزی از دو نیاز صنعت و شرب کمتر به‌دست آمده است که در طبیعت نیز به دلیل تبخیر این مقدار کمتر است. بیشترین مقدار برگشتی برای نیاز شرب نیز با واقعیت همخوانی دارد. صرف نظر از نتایج به‌دست آمده برای ضرایب بازگشتی، هدف الگوریتم بهینه‌سازی در فرآیند

کالیبراسیون کم کردن تابع هدف است و در این فرآیند ممکن است جواب‌هایی خارج از واقعیت به‌دست آمده باشد، اما بیشترین تطابق بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حاصل شده است و از این ضرایب در برنامه‌ریزی و مدیریت آینده یک حوضه آبریز می‌توان استفاده کرد.

شکل ۳: هیدروگراف کالیبره شده جریان خروجی از حوضه با استفاده GA و TPSO



مرجع‌ها

[1] Sulis, Andrea, Valeria Ardizzone, Emilio Giorgio, and Giovanni M Sechi. *The Porting of Wargi-DSS to Grid Computing Environment for Drought Plans in Complex Water Systems.* Vol. 1, chap. 13 in *Advances in Grid Computing*, by Zoran Constantinescu, 253-273. InTech: InYechWeb.Org, 2011.

[2] Labadie, John W. *MODSIM 8.1: River Basin Management Decision Support System, User Manual and Documentation.* Ft Collins, Colorado: Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, 2010.

[3] MacLean, Angela Jean .*Calibration and Analysis of the MESH Hydrological Model applied to Cold Regions* . Thesis for the degree of Master of Applied Science in Civil ENgineering, Ontario,Canada: University of Waterloo, 2009.

[4] Modsen, Henrik و ,Jacobsen Torsten" .Automatic calibration of the MIKE SHE integrated hydrological modelling system ε" .*th DHI Software Conference, 6-8 June* .Helsingor, Denmark: Scanation Conference Centre, 2001.

[5] Shafer, John M و ,John W Labadie .*Synthesis and calibration of a river basin water management model* . Completion Report No. 89, Colorado Water Resources Recearch Institute, Ft. Collins: Colorado State University, 1978.

[٦] علیرضا, مهدی. مقدمه‌ای بر الگوریتم‌های ژنتیک و کاربردهای آن. تهران: ناقوس اندیشه, ۱۳۸۵.

[٧] شوریان, مجتبی. برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز: رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی. رساله دکتری, تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر, ۱۳۸۷.

[8] Liu, Hongbo, Abraham Ajith و ,Zhang Weishi" .A fuzzy adaptive turbulent particle swarm optimization" .*Int. J. Innovative Computing and Applications*.۲۰۰۷ ,