

مقایسه و ارزیابی روش های بهینه سازی سراسری در تخمین پارامترهای مدل هیدرولوژیکی رواناب روزانه

صادق صادقی طیس^۱، محسن پوررضا بیلندی^{۲*} و حسین خزیمه نژاد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بیرجند، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، ایران Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۵

چکیده

مسئله شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌هایی با کمبود یا فقدان ایستگاه‌های هواشناسی به صورت یک مشکل در مدل‌های هیدرولوژیکی مطرح است. در چنین شرایطی توسعه مدل‌هایی که بتواند پیش‌بینی سیلاب را با دقت کافی داشته باشد در کنار برآورد پارامترهای مدل هیدرولوژیکی لزوم استفاده از روش‌های نوین واسنجی را بیش از پیش نمایان می‌کند. تخمین پارامترهای این گونه مدل‌ها عموماً به صورت مستقیم به دلیل تعداد بالای پارامترها غیر ممکن می‌باشد و لازم است به کمک ابزارهای بهینه‌سازی (واسنجی مدل) آن‌ها را برآورد نمود. در تحقیق حاضر ارزیابی پنج روش بهینه‌سازی فراکوشی در برآورد پارامترهای مدل مفهومی بارش-رواناب روزانه Hymod در دو حوضه رودخانه داخل و خارج کشور (رودخانه کرج و لیف) انجام شد. ارزیابی روش‌های واسنجی مذکور با استفاده از داده‌های روزانه بارش و تبخیر و تعرق در هر حوضه انجام گردید. در این تحقیق از معیار ناش-ساتکلیف تغییر یافته برای اولین بار در ارزیابی خطای شبیه‌سازی های انجام شده بارش-رواناب استفاده گردید. با مقایسه مقادیر دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده روزانه با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی مدل، نتایج نشان از برتری محسوس روش های بهینه‌سازی مجموعه ذرات و تکامل تصادفی جوامع به نسبت سه روش دیگر (ترکیب روش‌های ژنتیک و مجموعه ذرات، جهش ترکیبی قورباغه و روش کرم شبتاب) داشت.

کلید واژه‌ها: روش‌های بهینه‌سازی، مدل بارش-رواناب، حوضه آبریز رودخانه کرج و رودخانه لیف.

Evaluation of Different Global Optimization Methods for Calibration of a Daily Hydrological Model

S. Sadeghitabas¹, M. Pourrezabilondi^{2*}, H. Khozaymehnezhad³

1- M.Sc Student, Water Resources Engineering, University of Birjand, Iran.

2* - Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Iran.

Received: 26 May 2014

Accepted: 22 November 2014

Abstract

Runoff simulation is a challenging issue in ungauged basins with missing data. Therefore hydrological modeling involved with new automatic calibration methods should be considered seriously. Since adjusting the models with high parameters manually is a time-consuming and labor-intensive task, automatic calibration techniques are generally required to obtain reasonable estimates of the model parameters. Thus in this research we aim to compare and assess calibrating of a conceptual daily rainfall-runoff model (Hymod) with five global optimization methods (GOMs). As well, two case studies (Karaj and Leaf Rivers) were selected to assess and

present the results adopted from runoff modeling with two forcing data, rainfall and evapotranspiration series. A new performance criteria, KGE as a new criterion is decomposition of the widely used Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) was applied in this study to analyse the different components that constitute NSE. Results revealed that particle swarm optimization (PSO) and shuffle complex evolution (SCE) may be more efficient and robust significantly and will be able to simulate daily runoff with better performance criteria.

Keywords: optimization method, rainfall runoff model, Karaj and Leaf River basins.

ازدحام ذرات به ترتیب ترکیب کردند. کائو و زاهارا^۷ (۲۰۰۷)، یک ترکیب الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات را برای تابع چند نمایی به کار بردند. در این الگوریتم از الگوریتم ژنتیک شناور ارائه شده توسط ونگ و کیو^۸ (۲۰۰۵)، استفاده گردید که در آن مکانیزم جهش با الگوریتم ازدحام ذرات تعیین می شود. سپس سیاست نخبه‌گرا به منظور بالا بردن روند تکامل به کار گرفته شد. الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه برای اولین بار در منابع آب توسط یوسف و لنسی^۹ (۲۰۰۳)، مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها از این روش جهت تعیین قطر بهینه لوله‌ها در طراحی و توسعه شبکه توزیع آب شهری استفاده کردند و سپس مدل کامپیوتری SFLANET را بر اساس این الگوریتم ارائه دادند. در این مدل از ابزار شبیه‌سازی EPANET به صورت ترکیب با مدل بهینه‌سازی الگوریتم جهش قورباغه استفاده شده است. نتایج حاصل با نتایج روش‌های مختلف (بهینه‌سازی خطی، الگوریتم ژنتیک و غیره) مقایسه شد و نشان داد که سرعت همگرایی و عملکرد این الگوریتم نسبت به سایر روش‌ها بهتر بوده است. یوسف و همکاران^{۱۰} (۲۰۰۶)، با توسعه این الگوریتم، از آن برای حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده کرد و نیز آن را برای واسنجی کردن مدل آب‌های زیرزمینی و طراحی شبکه توزیع آب به کار برد. نتایج نشان داد الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه دارای سرعت همگرایی بهتر و راه حل مطلوب‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک است. قادری و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۶)، واسنجی اتوماتیک یک مدل بارش-رواناب را با استفاده از الگوریتم تکامل تصادفی جوامع انجام دادند. ژانگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۸)، کاربرد پنج الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تصادفی جوامع، ژنتیک، ازدحام ذرات، تکامل تفاضلی^{۱۱} و سیستم‌های ایمنی مصنوعی^{۱۲} را در واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد در بیش از ۲۰۰۰ بار اجرا مدل الگوریتم ژنتیک جواب بهتری داده است. اما زمانی که تعداد اجرای مدل کمتر از ۲۰۰۰ بار بود، الگوریتم ازدحام ذرات نتایج بهتری ارائه داد. در نتیجه با توجه به مقایسه طول زمان محاسبات، الگوریتم ازدحام ذرات به دیگر روش‌ها ترجیح داده شد. برهانی و داریان فرهمندفر^{۱۱} (۲۰۱۱)،

مقدمه

در دهه‌های اخیر به علت اهمیت برنامه‌های مدیریت حوضه های آبریز، احتیاج فراوانی به اطلاعات کافی و تخمین صحیح بارش و رواناب در حوضه‌های آبریز وجود داشته است. با توجه به اهمیت این مساله، مدل‌های مفهومی مختلفی ارائه شده است که این مدل‌ها همواره دارای پارامترهایی هستند که می‌بایست با توجه به داده‌های مشاهداتی مورد تخمین قرار گیرد. تخمین دقیق این پارامترها، از اهمیت بسزایی برخوردار است و مطالعات و تحقیقات بعد بستگی به چگونگی تخمین پارامترهای مذکور دارد. یکی از روش‌های واسنجی مدل‌ها استفاده از روش‌های واسنجی خودکار (الگوریتم‌های بهینه‌سازی) است که نسبت به روش‌های سعی و خطا سریع‌تر و دقیق‌تر است.

بهینه‌سازی یکی از روش‌ها و ابزارهای اساسی اقتصاد و مدیریت در حال حاضر است، چرا که از یک سو منابع وامکانات موجود ثابت بوده و حتی در مواردی رو به کاهش می‌باشد و از سوی دیگر نیازها و درخواست‌ها رو به افزایش است. بسیاری از این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت بوده و بر اساس یکی از شیوه‌های گوناگون جستجوی تصادفی عمل می‌کنند و به الگوریتم‌های فراکوشی^۱ معروف می‌باشند. اگرچه این الگوریتم‌ها دستیابی به بهینه مطلق را تضمین نمی‌نمایند، اما می‌توان با اطمینان بالایی به کسب جواب نزدیک به بهینه امیدوار بود. در الگوریتم‌های فراکوشی تابع هدف دارای روند آگاهانه است و فضای تصمیم به صورت هوشمندانه بررسی می‌شود. در این الگوریتم‌ها تابع هدف برای مجموعه‌ای (ترکیبی) از متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شود و از مقادیر تابع هدف به ازای ترکیب‌های مختلف، برای رسیدن به بهترین حالت استفاده می‌شود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۲، تکامل تصادفی جوامع^۳، ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات و ژنتیک^۴ و جهش ترکیبی قورباغه^۵ از این دسته از روش‌های بهینه‌سازی می‌باشند که تاکنون در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله می‌توان به مطالعه فن^۶ و همکاران^۶ (۲۰۰۶)، اشاره کرد که روش سیمپلکس را با الگوریتم‌های ژنتیک و

7- Kao and Zahara

8- Wang and Qiu

9- Eusuff and Lansey

10- Zhang

11- Differential Evaluation

12- Artificial Immune Systems

1- Evolutionary Optimization Methods

2- Particle Swarm Optimization

3- Shuffled Complex Evolution

4-Hybrid Genetic Algorithm and PSO

5-Shuffled Frog Leaping Algorithm

6- Fan

مواد و روش‌ها

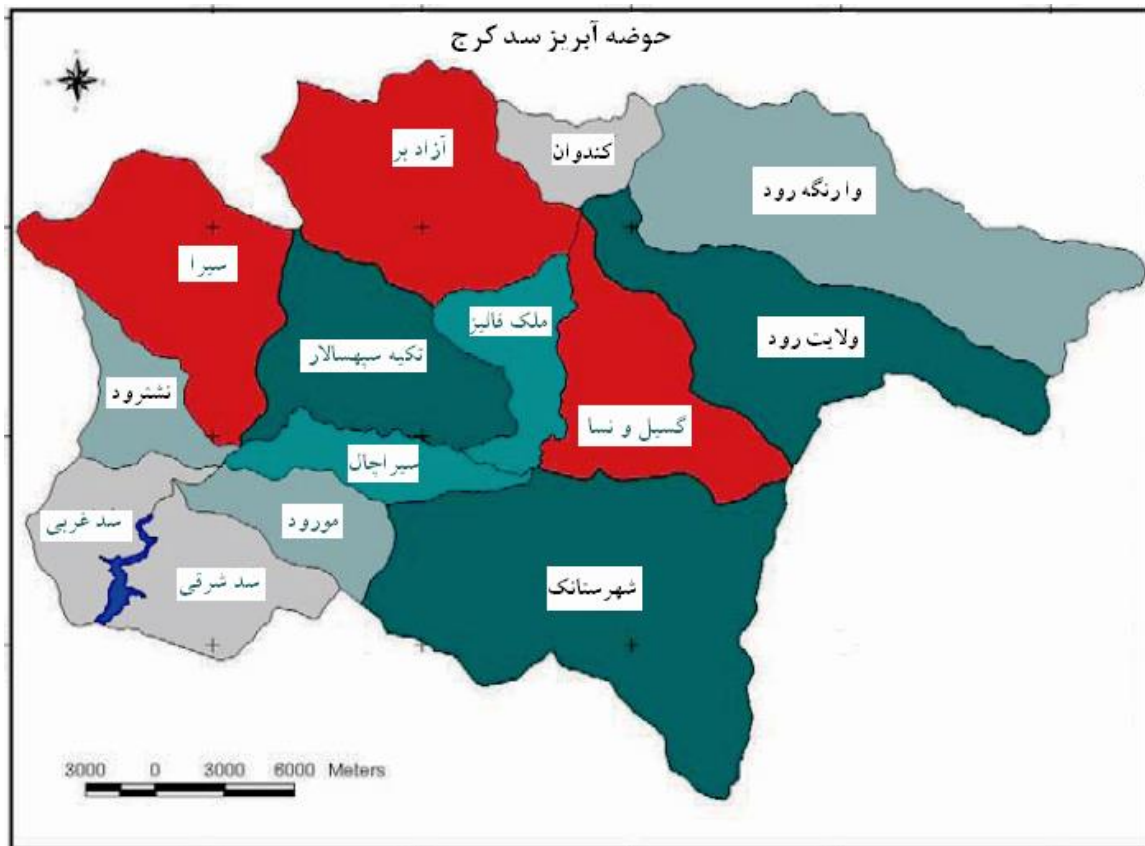
موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه حوضه آبریز

رودخانه کرج

حوضه آبریز رودخانه کرج (بالادست سد امیر کبیر)، در فاصله ۳۰-۶۰ کیلومتری شمال و شمال غربی تهران واقع گردیده و به دلیل قرار داشتن سد امیر کبیر در خروجی آن، یکی از حوضه‌های آبریز مهم در تأمین آب تهران به شمار می‌آید. حوضه آبریز کرج در محدوده بالادست سد کرج با مساحتی برابر ۸۴۰ کیلومتر مربع در پهنه جنوبی رشته کوه‌های البرز مرکزی واقع شده است. این حوضه ما بین عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه و ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه قرار گرفته و طول جغرافیایی آن در غربی‌ترین نقطه آن برابر ۵۱ درجه و ۰۳ دقیقه و در شرقی‌ترین نقطه ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه است. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرج در شکل (۱) نشان داده شده است.

پارامترهای یک مدل بارش-رواناب را به کمک الگوریتم‌های فراکوشی جفت‌گیری زنبور عسل و ژنتیک واسنجی نمودند. و نتایج حاصل از دو روش بهینه‌سازی را با یکدیگر مقایسه کردند.

از آنجا که در تحقیقات مربوط به واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی تاکنون مقایسه و ارزیابی جامعی از روش‌های بهینه‌سازی انجام نگرفته است، در این تحقیق سعی گردید تا مقایسه و ارزیابی پنج روش بهینه‌سازی: مجموعه ذرات، تکامل تصادفی جوامع، ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات، کرم شب‌تاب و جهش ترکیبی قورباغه، در برآورد پارامترهای مدل مفهومی بارش-رواناب روزانه Hymod در دو حوضه رودخانه کرج و لیف انجام گردد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سد کرج در ایران (انسانیت، ۱۳۹۱)

حوضه آبریز رودخانه لیف

حوضه آبریز رودخانه لیف با مساحت تقریبی ۱۹۵۰ کیلومتر مربع در شمال شهر کالینز^۱ در ایالت می‌سی‌سی‌پی کشور آمریکا قرار دارد (شکل ۲). حوضه مذکور دارای آب و هوای مرطوب بوده و داده های هواشناسی (بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه) و هیدرومتری (دبی روزانه) در مدل بارش-رواناب مربوط به آن از سایت گروه عمران و محیط زیست دانشگاه کالیفرنیا آمریکا به عنوان حوضه معرف دارای داده های موثق اخذ شده است. لازم به ذکر است از داده های حوضه معرف مذکور تاکنون در تحقیقات بسیاری استفاده شده است (یاپو^۲ و همکاران، ۱۹۹۸، روت^۳ و همکاران، ۲۰۰۲، میسرلی^۴، ۲۰۰۳ و بویل^۵ و همکاران، ۲۰۰۰).

الگوریتم های بهینه سازی

یکی از روش های واسنجی مدل ها استفاده از روش های واسنجی خودکار (الگوریتم های بهینه سازی) است که نسبت به روش های سعی و خطا سریع تر و دقیق تر است. الگوریتم های بهینه سازی را عموماً می توان در دو دسته ی جستجوی موضعی^۶ و جستجوی سراسری^۷ دسته بندی کرد. روش های جستجوی موضعی برای توابع چند نمایی^۸ مناسب نیستند زیرا ممکن است در یک نقطه ی بهینه ی موضعی متوقف شوند و نمی توان مطمئن بود که بهینه سراسری یافت شده است (لیو^۹ و همکاران، ۲۰۰۷).

از سوی دیگر روش های بهینه سازی سراسری، به ویژه برای جستجوی نقطه بهینه سراسری طراحی شده اند. در نتیجه، پژوهش ها در روش های بهینه سازی واسنجی مدل های مفهومی بارش-رواناب به سمت روش های بهینه سازی سراسری گرایش یافته است. از جمله این روش ها می توان، الگوریتم های بهینه سازی بکار رفته در این تحقیق که در ادامه به آن ها اشاره گردیده است را برشمرد. روش شناسی کلی در تمام این روش ها بدین ترتیب است که ابتدا برای هر پارامتر محدوده ای نسبتاً وسیع مقادیر ممکن تعیین می شود. سپس تعداد متنای سری پارامترها توسط الگوریتم های بهینه سازی تولید شده و برای هر سری پارامتر، مدل بارش-رواناب اجرا می شود. کارایی هر سری پارامتر با معیارهای مختلف مانند ضریب همبستگی، ضریب ناش-ساتکلیف، آماره ریشه میانگین مربعات خطا و غیره ارزیابی می گردد. سپس مدل تکرار می گردد و فرآیند تکامل تا رسیدن به همگرایی ادامه یافته و سری پارامتر بهینه مشخص می گردد.

الگوریتم بهینه سازی مجموعه ذرات (PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات اولین بار توسط کندی و ابرهارت^{۱۰} (۱۹۹۵)، ارائه گردید. این الگوریتم شبیه سازی یک رفتار دسته جمعی است که ایده اصلی آن از نحوه حرکت منظم و هماهنگ دسته پرنده ها و ماهیان نشأت گرفته است. در الگوریتم ازدحام ذرات مانند سایر تکنیک های محاسباتی تکاملی، از یک جمعیت که شامل راه حل های بالقوه مسئله تحت بررسی است، برای اکتشاف در فضای جستجو استفاده می کند. در این روش هر ذره دارای یک بردار سرعت می باشد که مسئول تغییر دادن موقعیت آن ذره به منظور اکتشاف در بین جواب های موجود است. اگر فضای جستجو، یک فضای D بعدی باشد، ذره i از جمعیت با بردار D بعدی $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ، سرعت (تغییر مکان) این ذره با بردار D بعدی $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ، بهترین مکان دیده شده تا به حال توسط ذره i به صورت $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ و بهترین ذره در کل جمعیت با اندیس g نشان داده می شود. جمعیت ذرات مطابق با دو جمله معادله زیر به حرکت وا داشته می شوند:

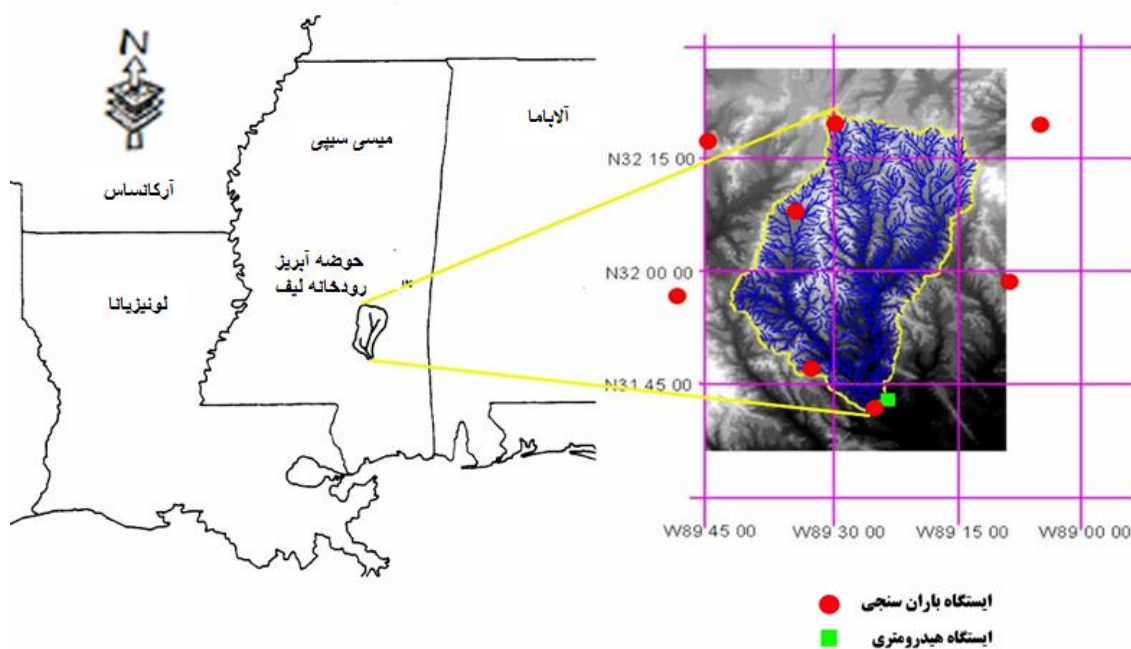
$$V_{id}^{n+1} = x(v_{id}^n + c_1 r_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (p_{pg}^n - x_{id}^n)) \quad (1)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (2)$$

که در این روابط $d=1,2,\dots,D$ ، $i=1,2,\dots,N$ ؛ برابر با اندازه جمعیت، n: شماره تکرار، ω : وزن اینرسی، c_1, c_2 : دو ثابت مثبت به نام های ضرایب شناخت و اجتماعی، x : فاکتور انقباض (می توان مانند ω برای محدود کردن سرعت بکار رود) و r_1, r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک می باشند.

ابتدا با داشتن محدوده متغیرها (حداقل و حداکثر) به طور تصادفی جمعیت اولیه و حداکثر سرعت قابل قبول متغیرها با توجه به رابطه تجربی نصف تفاضل حداکثر و حداقل محاسبه می شود. سپس سرعت اولیه متغیرها با داشتن حداکثر سرعت مجاز به طور تصادفی تولید می گردد. بعد از مرحله اولیه، مکان و سرعت محاسبه می شود و موقعیت جدید تعیین می شود. در محاسبات فوق، برای هر تکرار از الگوریتم با استفاده از مقادیر به دست آمده برای متغیرهای تصمیم مسئله، محاسبات مدل شبیه سازی صورت گرفته و با تعیین مقادیر بهینه آنها با توجه به مقدار تابع هدف به دست آمده، مقادیر جدید متغیرها به دست آورده می شوند. این روند تا رسیدن به یک تعداد تکرار حداکثر و یا یکسان شدن جواب بهینه عمومی در چندین تکرار متوالی ادامه می یابد.

- 1-Collins
- 2-Yapo
- 3-Vrugt
- 4-Misirli
- 5-Boyle
- 6- Local Optimum
- 7- Global Search
- 8- Multi-Modal
- 9- Liu



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه لیف در کشور آمریکا

نواحی مورد علاقه می‌شود. دسته بندی جوامع باعث جهت گیری مناسب تر جستجو به سمت نواحی است که توسط خصوصیات جوامع قبلی مشخص شده‌اند. استفاده از روش تکامل رقابتی نظام-گرا در جهت اطمینان از پایداری نسبی جستجو و هدایت آن در جهت ساختار تابع هدف می‌باشد. ترکیب مفاهیم فوق روش تکامل تصادفی جوامع را به یک روش کارا، موثر و مقاوم و قابل انعطاف تبدیل کرده است.

روش تکامل تصادفی جوامع یک روش تکامل گرا است که از دو بخش کلی به نام تکامل تصادفی جوامع و تکامل تصادفی رقابتی^۲ تشکیل شده است. یک توصیف کلی از الگوریتم روش فوق به شرح زیر ارائه می‌گردد:

الف) برداشت مجموعه تصادفی از نقاط و تقسیم بندی آن‌ها به تعدادی جامعه.

ب) تکامل جداگانه هر کدام از جوامع در جهت توسعه سراسری با استفاده از تکنیک تکامل رقابتی.

ج) در پایان هر مرحله، کل مجموعه های بدست آمده برهم زده شده و با هم ترکیب می‌شوند.

در روش تکامل تصادفی جوامع آموزش به صورت گروهی یا به صورت زیر گروه‌ها انجام می‌شود و هر کدام از اعضای گروه یک پاسخ برای مساله می‌باشند. در این روش تمام اعضای گروه تمایل به پیروی و حرکت در جهت و موقعیت رهبر گروه را دارند و این در حالی است که خود رهبر گروه نیز دارای موقعیت ثابتی نیست و در هر تکرار به موقعیت نقطه بهینه نزدیکتر می‌شود.

الگوریتم تکامل تصادفی جوامع (SCE)

تکامل تصادفی جوامع یک روش بهینه سازی سراسری فراذهنی است که توسط دوان^۱ و همکاران (۱۹۹۲)، ارائه شد و به سرعت به یکی از روش‌های معمول مورد استفاده در مهندسی منابع آب تبدیل شد. بر اساس الگوریتم این روش، یک نمونه برداری تصادفی از نقاط برداشت شده و به یک سری جوامع تقسیم بندی می‌شوند. هر کدام از جوامع می‌توانند به تنهایی با استفاده از تکنیک‌های تکامل رقابتی بر اساس روش سیمپلکس گرادیان نزولی به سمت نقطه بهینه سراسری حرکت کنند. در پایان هر مرحله، کل مجموعه نقاط برهم زده شده و اطلاعات آنها به اشتراک گذاشته شده و جوامع جدید را تشکیل می‌دهند. تکمیل تکامل رقابتی و برهم زدن، این اطمینان را حاصل می‌کند که اطلاعات مجزای به دست آمده توسط هر جامعه با کل جوامع به اشتراک گذاشته شود. این عمل باعث می‌شود که یک جستجوی دقیق و مقاوم در فضای امکان پذیر انجام گیرد. بنابراین می‌توان گفت که روش تکامل تصادفی جوامع بر اساس ترکیب چهار مفهوم موفق ترکیبات تصادفی، رویکردهای قطعی دسته بندی، تکامل نظام گرای نقاط پخش شده در فضای جوامع و تکامل رقابتی به وجود آمده است.

استفاده از روش قطعیت امکان استفاده مناسب از اطلاعات سطوح پاسخ برای هدایت جستجو را در الگوریتم فوق فراهم می‌کند. عناصر تصادفی، انعطاف پذیری الگوریتم را افزایش می‌دهند. انتخاب تصادفی تعداد زیاد نقاط انتخاب شده باعث کامل تر شدن جوامع از لحاظ دارا بودن تعداد، موقعیت، اندازه، خصوصیات و

کرم شب تاب) در نظر گرفت که به صورت متناسب با کیفیت آن در یک محیط تابیده می شود. متعاقباً هر کرم شب تاب، همتایان خود را (صرف نظر از جنسیتشان) جذب می کند که فضای جستجو را به صورت مؤثرتری بررسی می کند.

الگوریتم کرم شب تاب دارای سه قانون خاص می باشد که مبتنی بر برخی ویژگی های کرم های شب تاب واقعی است. این سه قانون عبارتند از:

- تمامی کرم های شب تاب دو جنسیتی هستند و آنها صرف نظر از جنسیت خود به صورت جذاب تر و شفاف تری حرکت خواهند کرد.

- درجه جذابیت یک کرم شب تاب با درخشش آن متناسب است. همچنین ممکن است درخشندگی با افزایش فاصله از کرم های شب تاب دیگر کاهش یابد. حال اگر یک کرم شب تاب جذاب تر یا شفاف تر نسبت به این کرم وجود نداشته باشد، آنگاه به صورت تصادفی حرکت خواهد کرد.

- درخشندگی یا شدت نور یک کرم شب تاب، توسط مقدار تابع هدف مشخص می شود (یانگ، ۲۰۰۹).

این الگوریتم مبتنی بر برقراری ارتباط سراسری میان ذرات می باشد. بنابراین در بهینه سازی چند هدفی کارآمد تر و مؤثرتر است.

الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه (SFLA)

الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه برای اولین بار در منابع آب توسط یوسف و لنسی (۲۰۰۳) مورد استفاده قرار گرفت. هدف اصلی از بیان الگوریتم فوق، بیان مفهومی است که بتوان از آن در حل مسائل پیچیده بهینه سازی، بدون استفاده از روابط ریاضی استفاده کرد. در مورد الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه می توان گفت که الگوریتم فوق ترکیبی از دو الگوریتم ژنتیک بر مبنای الگوریتم ممتیک^۲ و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات است. در واقع می توان گفت که الگوریتم جهش ترکیبی قورباغه از ترکیب مزیت های دو الگوریتم ممتیک و ازدحام ذرات بوجود می آید.

این الگوریتم از زندگی گروهی قورباغه ها زمانی که به دنبال غذا می گردند الهام گرفته شده است. در روش مفروض هر قورباغه بیانگر جوابی از مسئله می باشد. در روش مفروض جمعیت اولیه را به چند گروه مجزا تقسیم می کنند که تعداد قورباغه های موجود در همه ی گروه ها با هم برابر است. بر اساس این تقسیم بندی دو نوع تکنیک جستجو در این الگوریتم وجود دارد، تکنیک اول که تکنیک جستجوی محلی است و بر اساس آن قورباغه ها در هر گروه با تبادل اطلاعات موقعیت خود را نسبت به غذا (بهترین جواب) بهبود می دهند و تکنیک دوم مربوط به تبادل اطلاعات بین گروه ها می باشد، که بر اساس آن، بعد از هر جستجوی محلی در گروه ها، اطلاعات به دست آمده بین گروه ها با هم مقایسه می شود.

جزئیات الگوریتم در مراجع متعددی ارائه شده است (دوان و همکاران، ۱۹۹۲، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴).

ترکیب الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات

روش های فرا ابتکاری مثل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات که تکنیک های محاسباتی گرفته شده از فرآیند های زندگی زیستی در طبیعت می باشند، توانایی های بسیاری برای بدست آوردن ابر (محدوده) فضای بهینه دارند که به طور خاص می توان به همگرایی سریع الگوریتم ازدحام ذرات اشاره کرد. همچنین می توان از مزیت جستجوی سراسری در الگوریتم ژنتیک و قابلیت جستجوی موضعی در الگوریتم ازدحام ذرات برای بالا بردن دقت حل مساله استفاده کرد. بنابراین یک الگوریتم مبتنی بر ترکیب الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات به نام H-GA&PSO ارائه می شود. به علت توانایی در جستجو، ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات جای کار بسیاری برای محققین دارد. جزئیات فرآیند الگوریتم به صورت زیر است:

- ۱) جمعیت اولیه بصورت تصادفی تولید می گردد.
- ۲) مقدار برازندگی برای هر ذره محاسبه می گردد.
- ۳) ذره با برازندگی بهتر ثبت می شود.
- ۴) بهترین موقعیت جاری و بهترین موقعیت سراسری به هنگام می شود.
- ۵) تعیین می شود که آیا بهترین موقعیت موضعی و سراسری تغییر می کند یا خیر؟ اگر تغییر کرد به مرحله هفت رفته و در غیر این صورت ادامه می یابد.
- ۶) از آنجا که بهترین موقعیت موضعی و سراسری تغییر نمی کند، لازم است بر مشکل گیر کردن مساله در حداقل محلی غلبه گردد. در این مرحله از مکانیزم جهش الگوریتم ژنتیک برای آشفتگی ذرات استفاده می شود.
- ۷) همه ذرات به هنگام می گردند.
- ۸) مقدار برازندگی برای هر ذره محاسبه می گردد.
- ۹) اگر تعداد معین شده نسل ها برقرار شده است توقف کرده و در غیر این صورت به مرحله سه باز می گردد.

الگوریتم کرم شب تاب (FireFly)

الگوریتم کرم شب تاب عنوان الگوریتم ذهنی مبتنی بر ازدحام ، برای وظایف بهینه سازی محدود، توسط یانگ^۱ (۲۰۰۹) ارائه شد. در این الگوریتم از رفتار تابشی کرم های شب تاب الهام گرفته شده است. این الگوریتم یک رویه تکراری مبتنی بر جمعیت را با عوامل بی شمار (تحت عنوان کرم های شب تاب) به کار می گیرد. به این عوامل امکان داده می شود تا فضای تابع هزینه را به صورت مؤثرتری نسبت به جستجوی تصادفی توزیع شده، بررسی کنند. تکنیک بهینه سازی هوشمند، مبتنی بر این فرضیه است که راه حل یک مشکل بهینه سازی را، می توان به عنوان عاملی

در روابط فوق، $rand$: یک عدد تصادفی بین صفر و یک می‌باشد و D_{max} : هم بیانگر بیشترین جابجایی که قورباغه می‌تواند داشته باشد. پس از اعمال تغییرات فوق در صورتی که قورباغه در موقعیت جدید ($X_{w(new)}$) دارای پاسخ (تابع هدف) بهتری نسبت به موقعیت قبلی ($X_{w(old)}$) بود، موقعیت قبلی قورباغه با موقعیت جدید جایگزین می‌گردد و در صورتی که جواب بهبود پیدا نکرد روابط (۴) تکرار می‌گردد با این تفاوت که در حالت جدید به جای X_b در روابط فوق X_g قرار می‌گیرد. اگر با اعمال تغییر فوق باز هم در جواب بهبودی حاصل نشد، یک جواب به صورت تصادفی تولید شده و جایگزین X_w می‌شود. به خاطر اینکه همه‌ی درایه‌های بردار X اعداد صحیح هستند، پس از هر بار اعمال روابط (۴) بایستی جواب حاصله گرد گردد.

(د) مرحله‌ی ج برای تعداد مشخص تکرار ادامه می‌یابد.
 (ه) در این مرحله پس از بهبود موقعیت قورباغه‌ها، جمعیت جدید از بهترین جواب تا بدترین جواب مرتب می‌شود.
 (ی) در صورتی که شرایط توقف الگوریتم حاصل شد، الگوریتم متوقف می‌شود در غیر این صورت به مرحله‌ی ب باز گشته و سایر مراحل تکرار می‌گردد.

مدل بارش- رواناب

برای شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب مدل‌های زیادی وجود دارد که همه آنها برای واسنجی نیاز به حداقل داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب متناظر دارند. در این تحقیق از مدل مفهومی Hymod استفاده گردید که برای شبیه سازی دبی خروجی در مقیاس زمانی روزانه به کار می‌رود. به منظور واسنجی این مدل به کمک الگوریتم‌های فراکاوچی، پارامترهای مدل به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند. حدود تغییرات متغیرهای تصمیم، مطابق جدول (۱) تعریف می‌شود.

در روش فوق مراحل زیر طی می‌شوند:
 الف) تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی. جمعیت اولیه متشکل از P قورباغه که در آن P راه حل می‌باشد که در اینجا به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_P \end{bmatrix}_{(P) \times (2 \times N)} \quad (3)$$

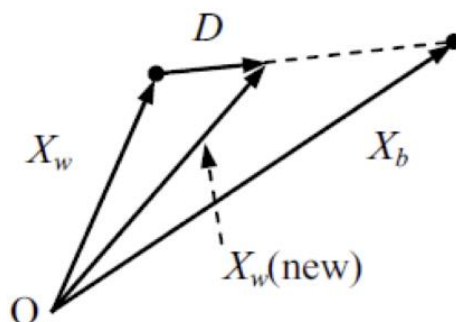
پس از ارزیابی جمعیت اولیه بر اساس تابع هدف بایستی رتبه‌بندی جمعیت از بهترین به بدترین جواب مشخص شود.

ب) تقسیم قورباغه‌ها به m گروه، هر گروه شامل n قورباغه $P = m \times n$ است به طوری که:

تقسیم قورباغه‌ها در گروه‌ها به این صورت است که اولین قورباغه از جمعیت مرتب شده به اولین گروه می‌رود، دومین قورباغه از جمعیت مرتب شده به دومین گروه می‌رود و m امین قورباغه از جمعیت مرتب شده به m امین گروه می‌رود برای $m + 1$ امین قورباغه از جمعیت مرتب شده دوباره به اولین گروه می‌رود و به همین شکل ادامه می‌یابد تا اینکه در هر یک از m گروه n قورباغه قرار گیرد.

ج) در این مرحله جستجوی محلی صورت می‌گیرد، به این شکل که در هر گروه قورباغه‌هایی با بدترین و بهترین جواب مشخص شده و به ترتیب با X_w , X_b نشان داده می‌شود، همچنین قورباغه‌ای را که در کل جمعیت دارای بهترین جواب بوده مشخص شده و با X_g نشان داده می‌شود. سپس در هر گروه موقعیت بدترین قورباغه X_w به صورت زیر اصلاح می‌گردد (شکل ۳).

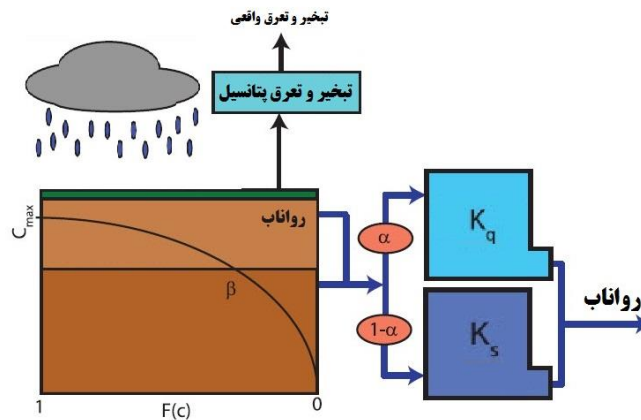
$$\begin{aligned} D_i &= rand \times (X_b - X_w) \\ X_{w(new)} &= X_{w(old)} + D_i \\ -D_{max} &\leq D_i \leq D_{max} \end{aligned} \quad (4)$$



شکل ۳- نمایش جهش بدترین قورباغه به سمت بهترین قورباغه (روابط ۴)

جدول ۱- حدود تغییرات پارامترهای مدل بارش-رواناب Hymod

معرفی پارامتر- واحد	نام اختصاری	کمینه	بیشینه
میزان بیشترین ذخیره رطوبتی در حوضه (میلی- متر)	Cmax	۱	۵۰۰
تغییرات مکانی ذخیره رطوبت خاک	Bexp	۰/۱	۲
فاکتور توزیع بین دو مخزن رطوبتی	Alpha	۰/۱	۰/۹۹
زمان ماندگاری در مخزن جریان آرام (روز)	Rs	۰/۰۰۱	۰/۱
زمان ماندگاری در مخزن جریان سریع (روز)	Rq	۰/۱	۰/۹۹



شکل ۴- نمایش مدل مفهومی بارش-رواناب روزانه Hymod

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{s_i})^2} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (8)$$

که در روابط فوق: Q_{o_i} : دبی مشاهده‌ای، Q_{s_i} : دبی شبیه‌سازی شده، \bar{Q}_o : میانگین دبی مشاهداتی، n : تعداد داده‌های مشاهداتی، CC : ضریب همبستگی خطی بین Q_s و Q_o ، α برابر نسبت انحراف معیار Q_s بر انحراف معیار Q_o و β برابر نسبت میانگین Q_s بر میانگین Q_o می‌باشد.

لازم به ذکر است معیار معرفی شده در رابطه (۵)، جدیدترین معیار ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که برای اولین بار در این مقاله از آن استفاده گردید. معیار مذکور در حقیقت تغییر یافته معیار ناش-ساتکلیف می‌باشد.

همچنین در شکل (۴) ارتباط بین پارامترهای مدل (پنج پارامتر جدول ۱) به همراه ورودی‌های مدل (بارش و تبخیر و تعرق) نشان داده شده است. مدل Hymod نیز به دلیل دقت نسبتاً بالا، سادگی و همچنین بار محاسباتی کم آن در مقالات متعددی به کار گرفته شده است (وانگ و لیو، ۲۰۰۵، روت و همکاران، ۲۰۰۳ و بویل ۲۰۰۰). بنابراین در اینجا از ذکر جزئیات بیشتر در این باره صرف نظر می‌شود.

معیارهای ارزیابی و سنجش مدل

برای ارزیابی و سنجش مدل از چهار معیار کلینگ گوپتا^(۱) (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۵) (KGE)، ناش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید که رابطه آن‌ها در زیر آمده است:

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (6)$$

از حوضه‌های مورد مطالعه در جدول‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول‌های فوق، شبیه‌سازی مقادیر دبی روزانه توسط مدل Hymod در دوره واسنجی برای هر کدام از روش‌های بهینه‌سازی در هر حوضه انجام گرفت. آبنمود حاصل در مقابل آبنمود مشاهداتی برای یک دوره سه ساله در برابر مقادیر بارش روزانه در حوضه‌های مورد مطالعه در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

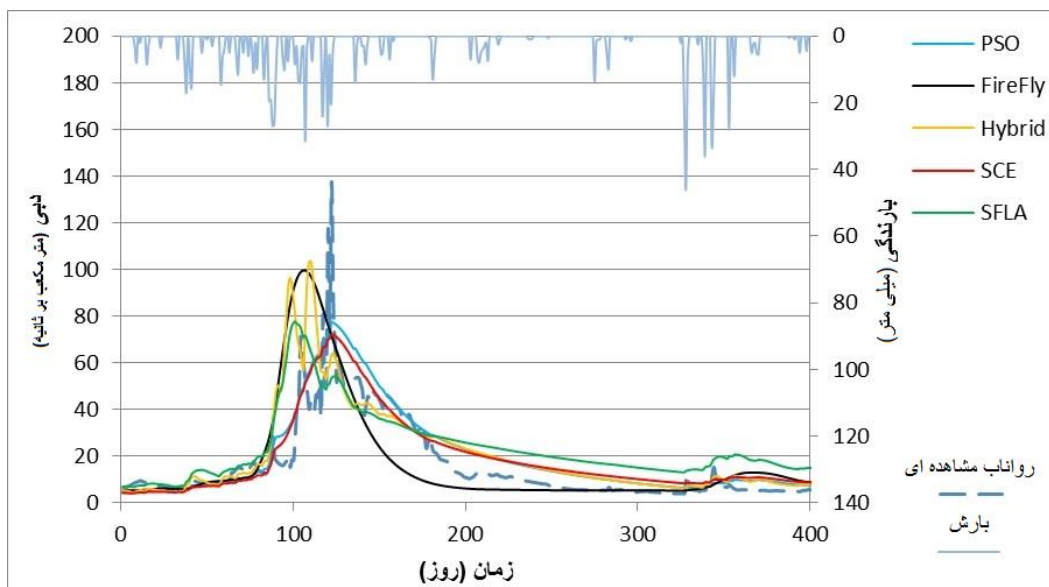
مدل Hymod توسط هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تعداد ۵۰۰ بار اجرا گردید. بدین ترتیب که، ابتدا متغیرهای تصمیم (پارامترهای مدل) در محدوده مشخص شده به صورت تصادفی نمونه‌گیری شده، سپس الگوریتم‌های بهینه‌سازی اجرا شده و پارامترهای بهینه محاسبه گردیدند. پارامترهای بهینه محاسبه شده به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده برای هر یک

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده برای حوضه رودخانه کرج

C_{max}	b_{exp}	Alpha	R_s	R_q	روش بهینه‌سازی
۵۰۰	۰/۴۵	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۱۰	ازدحام ذرات
۴۹۵/۰۷	۰/۴۶	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۱۰	تکامل تصادفی جوامع
۵۰۰	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۳۷	ترکیب روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات
۳۲۷/۹۵	۱/۵۰	۰/۱۴	۰/۰۰۱	۰/۱۰	کرم شبتاب
۴۹۰/۸۲	۱/۰۴	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۲۳	جهش قورباغه

جدول ۳- پارامترهای محاسبه شده به کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده برای حوضه رودخانه لیف

C_{max}	b_{exp}	Alpha	R_s	R_q	روش بهینه‌سازی
۳۱۱/۱۵	۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۰۲	۰/۴۷	ازدحام ذرات
۳۱۵/۷۰	۰/۶۱	۰/۹۸	۰/۰۵	۰/۴۷	تکامل تصادفی جوامع
۲۹۶/۵۰	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۰۰۱	۰/۵۱	ترکیب روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات
۳۴۴/۲۲	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۰۷	۰/۴۹	کرم شبتاب
۳۱۵/۱۰	۰/۲۲	۰/۷۰	۰/۰۵	۰/۳۷	جهش قورباغه

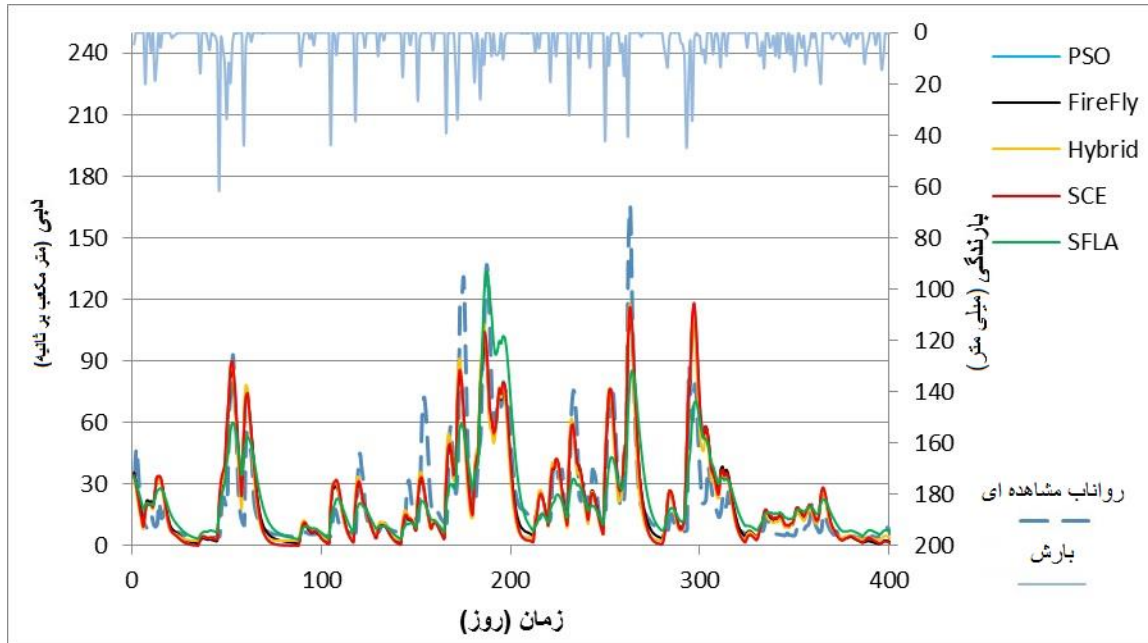


شکل ۵- دبی روزانه مشاهده ای و شبیه‌سازی شده مدل Hymod در دوره واسنجی برای هر کدام از روش‌های مذکور در حوضه رودخانه کرج (۸۷-۱۳۸۵)

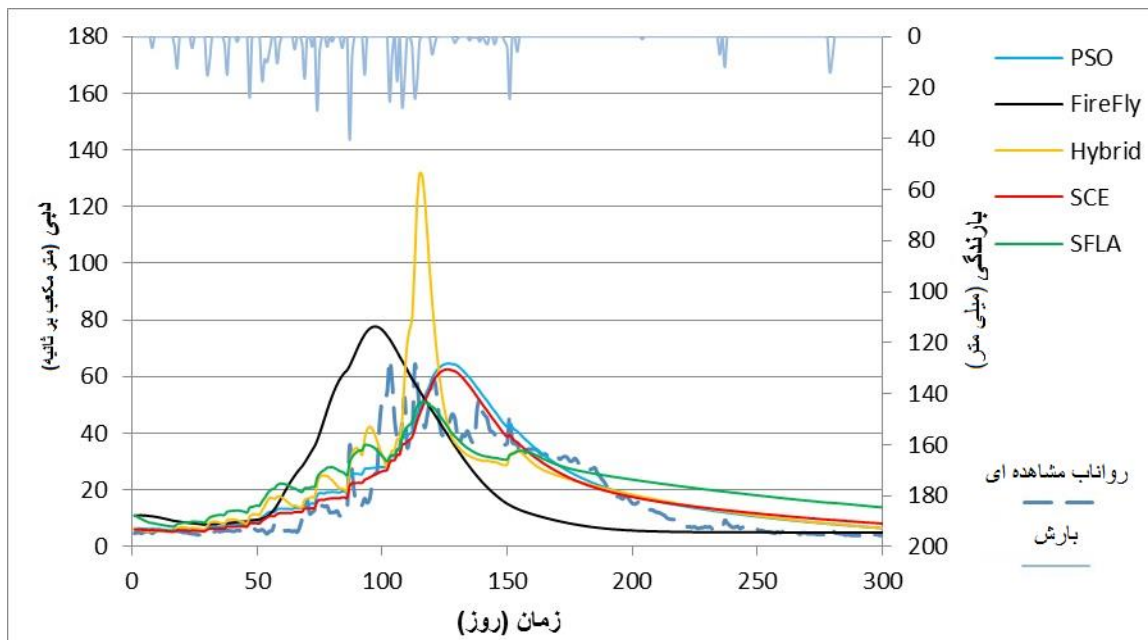
صادقی طبس و همکاران: مقایسه و ارزیابی روش های بهینه سازی سراسری...

سازی شده در دوره صحت سنجی در هر یک از حوضه های آبخیز، در شکل های (۷) و (۸) زیر قرار گرفته است.

به منظور ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی)، دوره صحت سنجی به مدت دو سال در هر یک از حوضه ها در نظر گرفته شد. مقایسه مقادیر چشمی آبنمود های مشاهداتی و شبیه



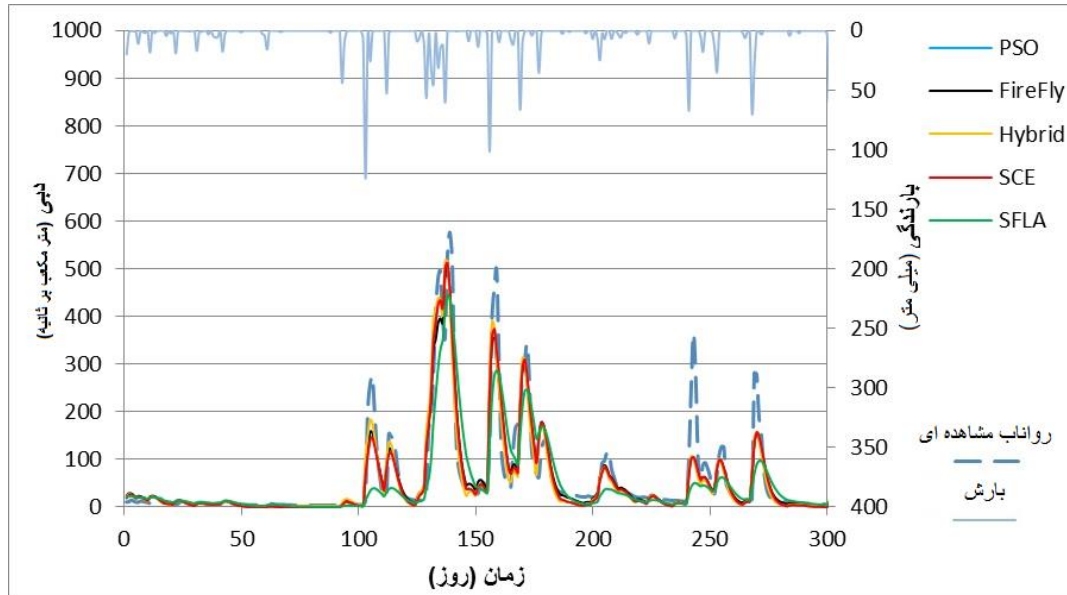
شکل ۶- دبی روزانه مشاهده ای و شبیه سازی شده مدل Hymod در دوره واسنجی برای هر کدام از روش های مذکور در حوضه رودخانه لیف (۵۹-۱۹۵۷)



شکل ۷- دبی روزانه مشاهده ای و شبیه سازی شده مدل Hymod در دوره صحت سنجی برای هر کدام از روش های مذکور در حوضه رودخانه کرج (۸۲-۱۳۸۱)

همبستگی و ضریب ناش- ساتکلیف در دوره واسنجی و صحت سنجی انجام گرفت (جدول‌های ۴ و ۵).

مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی شده و مشاهده شده با کمک آماره‌های کلینگ گوپتا، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب



شکل ۸- دبی روزانه مشاهده ای و شبیه‌سازی شده مدل Hymod در دوره صحت سنجی برای هر کدام از روش‌های مذکور در حوضه رودخانه لیف (۶۱-۱۹۶۰)

جدول ۴- مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی شده و مشاهده شده با کمک معیارهای ارزیابی مدل در حوضه

رودخانه کرج

دوره	روش بهینه‌سازی	NSE	RMSE	R ²	KGE
واسنجی	ازدحام ذرات	۰/۶۴	۸/۰۴	۰/۶۸	۰/۸۲
	تکامل تصادفی جوامع	۰/۶۴	۸/۰۰	۰/۶۶	۰/۸۰
	ترکیب روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات	۰/۳۶	۱۰/۶۴	۰/۵۰	۰/۷۰
	کرم شبتاب	۰/۱۶	۱۲/۲۷	۰/۴۰	۰/۶۱
	چپش قورباغه	۰/۳۲	۱۱/۰۴	۰/۴۷	۰/۵۱
صحت سنجی	ازدحام ذرات	۰/۷۸	۶/۵۵	۰/۷۹	۰/۸۴
	تکامل تصادفی جوامع	۰/۷۶	۶/۸۵	۰/۷۶	۰/۸۱
	ترکیب روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات	۰/۵۴	۹/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۳
	کرم شبتاب	۰/۱۰	۱۳/۳۴	۰/۳۳	۰/۵۷
	چپش قورباغه	۰/۵۵	۹/۳۶	۰/۷۳	۰/۵۱

جدول ۵- مقایسه مقادیر دبی شبیه سازی شده و مشاهده شده با کمک معیارهای ارزیابی

مدل در حوضه رودخانه لیف					
KGE	R ²	RMSE	NSE	روش بهینه سازی	دوره
۰/۸۸	۰/۷۹	۱۶/۶۰	۰/۸۲	ازدحام ذرات	واسنجی
۰/۸۸	۰/۷۹	۱۵/۵۱	۰/۸۲	تکامل تصادفی جوامع	
۰/۸۵	۰/۷۴	۱۸/۵۴	۰/۷۷	ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات	
۰/۸۶	۰/۷۷	۱۷/۲۱	۰/۸۰	کرم شبتاب	
۰/۷۰	۰/۶۵	۲۰/۹۳	۰/۷۱	جهش قورباغه	
۰/۸۲	۰/۸۶	۴۳/۶۵	۰/۸۶	ازدحام ذرات	صحت سنجی
۰/۸۱	۰/۸۶	۴۳/۴۵	۰/۸۶	تکامل تصادفی جوامع	
۰/۸۲	۰/۸۶	۴۳/۳۳	۰/۸۶	ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات	
۰/۷۸	۰/۸۵	۴۵/۸۰	۰/۸۵	کرم شبتاب	
۰/۶۴	۰/۷۰	۶۳/۶۷	۰/۷۱	جهش قورباغه	

(۲۰۱۳)، استفاده از ویژگی ها و توانایی های همزمان دو روش ژنتیک و ازدحام ذرات می باشد.

نتیجه گیری

با توجه به اینکه مشکل اصلی در استفاده از مدل های حوضه آبریز، تعداد نسبتاً زیاد پارامترها، عدم وجود درک فیزیکی از آن ها و در واقع واسنجی این پارامترهاست، در این مقاله از پنج الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، تکامل تصادفی جوامع، ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات، کرم شبتاب و جهش قورباغه در برآورد سری پارامتر بهینه مدل بارش-رواناب Hymod در دو حوضه کرج و حوضه رودخانه لیف در آمریکا در دو مرحله واسنجی و صحت سنجی استفاده گردید. مرحله واسنجی این مدل به ازای سه سال داده های دبی روزانه به طور مجزا برای هر حوضه انجام گرفت و پس از مرحله واسنجی با استفاده از مشاهدات مستقل و به کار گرفتن سری پارامترهای مناسب باز گردانده از دوره واسنجی صحت مدل مورد تأیید قرار گرفت.

با بررسی نتایج و جدول های معیارهای ارزیابی به طور کلی می توان دو روش تکامل تصادفی جوامع و ازدحام ذرات را تا حدودی مناسب تر از دو روش دیگر ارزیابی نمود. خاصیت بهینه یابی مستقیم، همزمان با انتخاب تصادفی مقادیر پارامترها از فضای ممکن، این دو روش را تا حدودی کارا تر از بقیه نموده است. نتیجه حاضر از این حیث دارای اهمیت می باشد که توانایی های بالای الگوریتم تکامل تصادفی جوامع که به طور اختصاصی اولین بار نیز توسط دوان و همکاران (۱۹۹۳) برای واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی توسعه یافته بود را ثابت می کند. همچنین از حیث مقایسه با نتایج شان و همکاران (۲۰۱۳) - که تحقیق خود را در مورد مقایسه چند روش انجام داده اند - هماهنگ بوده و طبق گفته ایشان در مورد مدل های شبیه سازی با تعداد کم پارامتر، الگوریتم تکامل تصادفی جوامع روشی مناسب می باشد. الگوریتم

جدول فوق نشان می دهد که الگوریتم های ازدحام ذرات و تکامل تصادفی جوامع دارای نتایج بهتری نسبت به الگوریتم های ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات، کرم شبتاب و جهش قورباغه در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی می باشد. نتایج نشان از کارایی نسبی بیشتر دو روش اول در تعیین سری پارامتر بهینه در مدل بارش-رواناب روزانه Hymod داشت. این نتیجه گیری تقریباً در بیشتر مقاله های مرتبط (کاربرد الگوریتم ازدحام ذرات و تکامل تصادفی جوامع در واسنجی مدل های هیدرولوژیکی) گرفته شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱، ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸، وو^۱ و همکاران، ۲۰۱۳، ماتوت^۲ و همکاران، ۲۰۱۲ و چانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). عموماً این دو الگوریتم به دلیل دو فرآیند، جستجوی مستقیم و جستجوی تصادفی، به طور همزمان در فضای پارامتری، دارای برتری هایی به نسبت بقیه بوده و این ویژگی ها خود به عنوان دلایل بهتر بودن نتایج شان قابل ذکر می باشند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

سرعت رسیدن به همگرایی (پاسخ بهینه) الگوریتم های مورد بحث در این مقاله تقریباً با هم برابر بوده و تفاوت زیادی با یکدیگر ندارد. دلیل اصلی آن (طبق تحقیق شاون^۴ و همکاران، ۲۰۱۳) تعداد کم پارامترها می باشد. زیرا بر اساس یافته های تحقیق مذکور سرعت رسیدن به همگرایی تکامل تصادفی جوامع در مورد مدل هایی با تعداد پارامتر زیاد (بیشتر از پنج پارامتر) کمتر از سایر روش های بهینه سازی فراکاوشی می باشد ولی در مدلی همچون Hymod با پنج پارامتر تمام الگوریتم ها در زمان تقریباً برابر به همگرایی می رسند. در این تحقیق الگوریتم ترکیب روش های ژنتیک و ازدحام ذرات به طور نسبی سریع تر از بقیه به همگرایی رسید که دلیل آن نیز بر طبق تحقیق چانگ و همکاران

- 1- Wu
- 2- Matott
- 3- Chang
- 4- Shawn

ترکیب روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات به طور نسبی سریعتر از توانایی‌های همزمان دو روش ژنتیک و ازدحام ذرات می باشد. بقیه به همگرایی رسید که دلیل آن استفاده از ویژگی ها و

منابع

- ۱- انسانیت، ن.ح. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی رواناب روزانه با استفاده از الگوریتم PSO در بهینه‌سازی مدل‌های حوضه آبریز. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران-آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
- 2- Boyle, D. P. 2000. Multicriteria calibration of hydrologic models .Ph. D. Dissertation, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson.
- 3- Boyle, D. P., Gupta, H. V. and S. Sorooshian. 2000. Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36: 3663-3674.
- 4- Borhani Darian, A. R. and Z. Farahmandfar. 2011. Calibration of rainfall-runoff models using MBO algorithm. *the Iranian Society of Irrigation and Water Engineering*, 1 (4): 60-71.
- 5- Chang, J. X., Bai, T., Huang, Q. and D. W. Yang. 2013. Optimization of water resources utilization by PSO-GA. *Water Resources Management*, 27(10), 3525-3540.
- 6- Duan, Q. Sorooshian, S. and V.K. Gupta. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research*, 28(4): 1015-1031.
- 7- Duan, Q. Sorooshian, S. and V.K. Gupta. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global optimization. *Journal of Optimization Theory and Application*, 76(3): 501-521.
- 8- Duan, Q. Sorooshian, S. and V.K. Gupta. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibration watershed models. *Journal of Hydrology*, 185: 265-284.
- 9- Eusuff, M. and K. Lansey. 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3): 210-225.
- 10-Eusuff, M. Lansey, K. and F. Pasha. 2006. Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization. *Engineering Optimization*, 38(2): 129-154.
- 11-Fan, S. K. S. Liang, Y. C. and E. Zahara. 2006. A genetic algorithm and a particle swarm optimizer Hybridized with Nelder-Mead simplex search. *Computer & Industrial. Engineering*, 50: 401-425.
- 12-Gupta, H. V. Kling, H. Yilmaz, K. K. and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- 13-Kao, Y. T. and E. Zahara. 2007. A hybrid genetic algorithm and a particle swarm optimization for multimodal functions. *Applied Soft Computing*, 8 (2): 849-857.
- 14-Kennedy, J., and R., Eberhart, 1995. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, IEEE, Piscataway, PP. 1942-1948.
- 15-Matott, L. S. Tolson, B. A. and M. Asadzadeh. 2012. A benchmarking framework for simulation-based optimization of environmental models. *Environmental Modelling and Software*, 35: 19-30.
- 16-Misirli, F. 2003. Improving efficiency and effectiveness of Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models. Ph. D. dissertation. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona's, Tucson.
- 17-Liu, S. Butler, D. and R. Brazier. 2007. Using genetic algorithms to calibrate a water quality model. *Science of the Total Environment*, 374 (2-3): 260-272.

- 18-Qaderi, K. Mohammad, Vali Samani, J. Eslami, H. R. and B. Saghafian. 2006. Automatic calibration of a rainfall-runoff model using SCE optimization method. *Iran Water Resources Research*, 2(2): 39-52.
- 19-Shawn, M. Beth, H. Camden, R. Christine, B. and A. Shirmin. 2013. Telescoping strategies for improved parameter estimation of environmental simulation models. *Computers and Geosciences*, 60: 156-167.
- 20-Vrugt, J. A. Bouten, W. Gupta, H. V. and S. Sorooshian. 2002. Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: the information content of experimental data. *Water Resources Research*, 38(12): 48-1.
- 21-Vrugt, J. A. Gupta, H. V. Bouten, W. and S. Sorooshian. 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 39(8).
- 22-Wang, F. and Y. Qiu. 2005. A modified particle swarm optimizer with roulette selection operator. *Natural Language Processing and Knowledge Engineering. IEEE NLP-KE'05*. 765-768.
- 23-Wu, Y. Liu, S. Li, Z. Dahal, D. Young, C. J. Schmidt, G. L. and J. Oeding. 2013. Development of a generic auto-calibration package for regional ecological modeling and application in the Central Plains of the United States. *Ecological Informatics*, 19: 35-46.
- 24-Yang, X. S. 2009. Firefly algorithm for multimodal optimization in proceedings of the stochastic Algorithms. Foundations and Applications, (SAGA 109). 5792 of Lecture notes in Computer Sciences Springer
- 25-Yapo, P. O. Gupta, H. V. and S. Sorooshian. 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204: 83– 97.
- 26-Zhang, X. Srinivasan, R. Zhao, K. and Van M. Liew. 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Process*, 23(3), 430-441.
- 27-Zhang, X. Srinivasan, R. Arnold, J. Izaurrealde, R. C. and D. Bosch. 2011. Simultaneous calibration of surface flow and baseflow simulations: a revisit of the SWAT model calibration framework. *Hydrological Processes*, 25(14): 2313-2320.