Research Paper

Comparing Simulated Annealing (SA) and Particle Swarm Algorithms (PSO) for Optimizing Hydrological Parameters in Mahabadchay Watershed

Kazem Shahverdi[1]*, Hirad Abghari[2], Akbar Farzi Bolaghi[3]

1. Assistant Prof. of Water Science and Engineering, College of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Associate Prof. of Range and Watershed Management, College of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
3. Former M.Sc. Student of Range and Watershed Management, College of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 2019/11/05
Revised: 2020/05/13
Accepted: 2021/01/17

Use your device to scan and read the article online

DOI: 10.30495/wej.2021.23220.2206

Keywords:
Mahabadchay Watershed, HEC-HMS, PSO, SA, AutoIt.

Abstract

Introduction: Rainfall and runoff process is one of the main phases of the hydrological cycle and is simulated using hydrological models to examine the relationship between rainfall and runoff. The accuracy of the runoff estimation depends on the input parameters of the hydrological model including the sub-basins Curve Number (CN), Initial abstraction (Ia) and Lag time (Lt).

Methods: In this study, to more accurately estimate the simulated discharges computing through the hydrological model HEC-HMS in Mahabadchay watershed, the input parameters were calibrated. For this purpose, two evolutionary algorithms including Particle Swarm Optimization (PSO) and Simulated Annealing (SA) were used. In each iteration, the basin hydrological parameters are estimated using optimizer and given to the simulator. Afterwards, simulations are made. The Root Mean Square Error (RMSE) was used as objective function. The AutoIt software was used to automatically couple the optimization algorithms with HEC-HMS model. The rainfall-runoff data related to the 5 events of year 1387 were used to calibrate and validate the optimal parameters.

Findings: The results showed PSO convergence speed is more than SA algorithm in finding optimal objective function value and calibrating the hydrological parameters including CN, Ia, and Lt. Also, the optimal computed hydrograph found by SA algorithm had good agreement with that of by PSO one. Considering the results, it is concluded that the hydrologic parameters of watersheds without data can accurately be estimated by linking optimization and hydrologic models.

Citation: Shahverdi K, Abghari H, Farzi Bolaghi A. Comparing Simulated Annealing (SA) and Particle Swarm algorithms (PSO) for Optimizing Hydrological Parameters in Mahabadchay Watershed. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(54): 19-28.

***Corresponding author:** Kazem Shahverdi
Address: Dept. of Water Science and Engineering, College of Agricultural, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
Tell: +989128411435
Email: k.shahverdi@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The rainfall and runoff process is one of the main phases of the hydrological cycle and is simulated using hydrological models to examine the relationship between rainfall and runoff. The most important goal in the calibration of HEC-HMS input parameters is to find the optimal values of hydrologic parameters so that the difference between the calculated and observed discharges to be minimum. Due to the time-consuming and costly trial and error methods, it is necessary to use evolutionary optimization algorithms to automatically optimize the watershed parameters, including the sub-basins Curve Number (CN), Initial abstraction (Ia), and Lag time (Lt). To do the optimization, the HEC-HMS hydrologic model and two optimization models of Particle Swarm Optimization (PSO) and Simulated Annealing (SA) were linked with AutoIt.

Materials and Methods

In this study, to more accurately estimate the simulated discharges computing through the hydrological model HEC-HMS in Mahabadchay watershed, the input parameters of CN, Ia, and Lt were calibrated. For this purpose, two evolutionary algorithms, including PSO and Simulated Annealing SA were used. In each iteration, the basin hydrological parameters are estimated using an optimizer and given to the simulator. Afterward, simulations are made by calling HEC-HMS hydrologic model with AutoIt and saved in the corresponding files in the HEC-HMS directory files. Then, an optimizer is called and the optimization is made. These steps are continued until finishing the iterations that were 1000 iterations. Actually, the AutoIt software was used to automatically couple the optimization models with HEC-HMS. The Root Mean Square Error (RMSE) was used as an objective function. The rainfall-runoff data related to the 5 events of the year of 2008 were used to calibrate and validate the models and find out the optimal hydrologic parameters. PSO is inspired from moving of fish and their social life, where there are a number of particles distributed in the search space of the function being optimized. At each moment, each particle adjusts its location in the search space according to the best location it has been in so far and the best location among all its neighbors. The idea of SA algorithm originates from the gradual cooling of metals for their greater strength, approaching the optimal solution of the problem by passing from one state to another. AutoIt is a software that can automatically move the mouse and window in the Windows environment. The lining between the models were done by writing corresponding works in AutoIt environment.

Findings

The HEC-HMS model of the Mahabadchay watershed was provided, and the two optimization models of PSO and SA were coded in MATLAB to read the input files of the HEC_HMS hydrologic software and do the optimization. The AutoIt code was written to link the hydrologic and optimization models, causing all the processes to be done automatically. The convergence behaviors of PSO and SA in reaching the optimal solutions were presented, resulting in the running time in SA is less than that of PSO. These modes can be used in any watershed without reliable data on hydrologic parameters. The determination coefficients obtained from PSO and SA were 0.83 and 0.82, respectively. Also, the RMSEs for both optimization models were obtained the same.

Discussion

The results showed the PSO convergence speed is more than the SA algorithm in finding optimal objective function value and calibrating the hydrological parameters including CN, Ia, and Lt. Also, the optimal computed hydrograph found by the SA algorithm had good agreement with that of by PSO one. In terms of accuracy, the prediction parameters are valid when the accuracy and predictability of these parameters are proven in the validation phase with an acceptable error. The validation of the extracted optimal parameters, including the curve number, initial loss, and lag time in the studied area, was done using the rainfall-runoff data

related to two events that were not used in the calibration phase. To compare the calculated and observed flow charts, the hydrograph simulated by HEC-HMS was drawn using the optimal parameters obtained from the calibration phase along with the observed hydrograph of the associated event. The predicted hydrographs using the optimal parameters of the SA algorithm have a better fit with the observed hydrograph than PSO. However, for both events, the predicted discharges are lower than the observed discharges. In other words, the value of the parameters optimized by both algorithms has estimated the flow rate lower than the actual value. However, the SA values are closer to the observed values.

Conclusion

Considering the results, it is concluded that the hydrologic parameters of watersheds without data can accurately be estimated by linking optimization and hydrologic models.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Kazem Shahverdi, Hirad Abghari, Akbar Farzi Bolaghi.
Methodology and data analysis: Kazem Shahverdi, Hirad Abghari, Akbar Farzi Bolaghi.
Supervision and final writing: Kazem Shahverdi, Hirad Abghari.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

مقایسه الگوریتم‌های سرد کردن فلزات (SA) و جامعه ذرات (PSO) در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه مهابادچای

کاظم شاهوردی[۱*]، هیراد عبقری[۲]، اکبر فرضی بلاغی[۳]
۱. استادیار علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. دانشیار مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴
تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI:
10.30495/wej.2021.23220.2206

واژه‌های کلیدی:
حوضه مهابادچای، HEC-HMS، PSO، SA، AutoIt.

چکیده

مقدمه: با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، فرایند بارش-رواناب شبیه‌سازی می‌شود. دقت نتایج حاصل از مدل‌های هیدرولوژیکی، به دقت پارامترهای هیدرولوژیکی ورودی به مدل از قبیل شماره منحنی (CN)، ضریب تلفات اولیه (Ia) و زمان تاخیر (Lt) بستگی دارد. با این حال، در بعضی از حوضه‌ها مقادیر پارامترهای هیدرولوژیکی بطور دقیق و یا اصلا وجود ندارد و تنها چند هیدروگراف مشاهده‌ای وجود دارد. یافتن مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولوژیکی در چنین حوضه‌هایی، ضروری است.

روش: برآورد دقیق پارامترهای CN، Ia و Lt در حوضه آبخیز مهابادچای (که فاقد آمار پارامترهای هیدرولوژیکی است) با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی PSO (Particle Swarm Optimization) و SA (Simulated Annealing)، هدف اصلی این تحقیق است. در هر تکرار، بهینه‌ساز مقادیر پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه را برآورد می‌کند که به عنوان ورودی‌های HEC-HMS استفاده می‌شوند. در ادامه مدل HEC-HMS، رواناب حوضه را شبیه‌سازی (دبی محاسباتی) می‌کند. در مرحله بعد دبی محاسباتی با دبی مشاهداتی مقایسه شده و بهینه‌ساز بر مبنای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان تابع هدف، پارامترهای هیدرولوژیکی را اصلاح کرده و این فرایند تا رسیدن به پاسخ بهینه، تکرار می‌شود. ارتباط بین مدل HEC-HMS و بهینه‌ساز با استفاده از برنامه‌ای که در AutoIt نوشته شد، برقرار و بهینه‌سازی به صورت خودکار انجام می‌شود. برای این منظور، از داده‌های ساعتی بارش-رواناب (دبی مشاهداتی) پنج رخداد مربوط به سال ۱۳۸۷ در حوضه آبخیز مهابادچای استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشانگر برآورد دقیق پارامترهای هیدرولوژیکی است و الگوریتم PSO سرعت بالاتری در همگرایی به تابع هدف بهینه و پیدا کردن پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه شامل CN، Ia و Lt داشت. همچنین، دبی‌های بهینه محاسباتی SA نسبت به PSO، تناسب بیشتری با مقادیر متناظر مشاهداتی داشت.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج تحقیق حاضر می‌توان نتیجه گرفت که با لینک مدل‌های بهینه‌سازی و مدل‌های هیدرولوژیکی می‌توان نسبت به براورد دقیق پارامترهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های فاقد آمار اقدام نمود و نتایج با دقت خوبی بدست آورد.

* **نویسنده مسئول:** کاظم شاهوردی
نشانی: گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
تلفن: ۰۹۱۲۸۴۱۱۴۳۵
پست الکترونیکی: k.shahverdi@basu.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های برآورد سیلاب در مناطق فاقد آمار، استفاده از مدل های ریاضی است. مدل‌های بارش–رواناب از جمله HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش–رواناب استفاده می‌شود. عملکرد مناسب مدل، تابع مقادیر پارامترهای ورودی آن جهت تطابق هرچه بیشتر بین دبی‌محاسباتی با داده‌های دبی مشاهداتی در مرحله واسنجی بستگی دارد (۸).

با این حال، برخی از حوضه‌ها مانند حوضه آبخیز مهابادچای فاقد آمار هیدرولوژیکی ورودی مدل HEC-HMS از قبیل شماره منحنی(CN) ، ضریب تلفات اولیه (Ia) و زمان تاخیر (Lt) هستند. واسنجی چنین حوضه‌هایی دارای پیچیدگی‌های بیشتری است. به دلیل وقت گیر بودن واسنجی دستیِ مدل‌های هیدرولوژیکی، بحث بهینه‌سازی خودکار با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی مورد توجه قرار گرفته است (۳).

الگوریتم های تکاملی (Evolutionary algorithms)، مجموعه‌یِ الگوریتم‌هایی هستند که برای حل مسائل بهینه‌یابی، بصورت تصادفی اما هدفمند و ساده در فضای جواب مسئله به سمت جواب بهینه حرکت می‌کنند. این روش ها معمولاً از طبیعت الهام گرفته می‌شوند. تحقیقات مختلفی به منظور شبیه‌سازی بارش–رواناب مشاهداتی و روش SCS در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS انجام شده و نتیجه بهینه‌سازی پارامترهای مدل، همخوانی خوب بین داده‌های محاسباتی و مشاهدتی مشاهده شده است (۷).

طی مطالعه‌ای در رودخانه مهران استان هرمزگان، الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه‌ساز سراسری برای واسنجی پارامترهای مدل هیدروگراف های واحد اشنایدر، کلارک و SCS در HEC-HMS به کار برده شد. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده، برای پیش‌بینی مشخصات حوضه‌ها روش مناسبی بوده که با استفاده از آن می‌توان پارامترهای بهینه حوضه شامل شماره منحنی، زمان تمرکز و ... را به دست آورد. نتایج حاکی از برازش مناسب دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بود به طوری که، اختلاف دبی اوج هیدروگراف مشاهده ای و شبیه‌سازی شده کمتر از ۱۰ درصد و اختلاف زمانی در رسیدن به اوج هیدروگراف نیز کم بود (۸). از مدل HEC-HMS، برای شبیه‌سازی فرایند بارش–رواناب در حوضه آبریز سد مهابادچای استفاده شد و نتایج حاصل مناسب ارزیابی گردید (۱).

در تحقیقی کارایی HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بررسی و مشخصات آبنمود سیل شامل دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج با استفاده از سه روش هیدروگراف واحد مصنوعیSCS ، اشنایدر و کلارک در حوضه آبخیز چهل‌گزی مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج نشان داد روش SCS در برآورد دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج، نسبت به روش‌های کلارک و اشنایدر کارایی بهتری دارد. بررسی پارامترهای مدل نشان داد که پارامتر شماره منحنی و مقدار تلفات اولیه دارای دارای حساسیت بالاتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف می‌باشن (۵).

تحقیقی برای کالیبراسیون خودکار مدل مفهومی HEC-HMS و الگوریتم بهینه‌سازی PSO در حوضه تمر از زیر حوضه‌های گرگان رود انجام شد. در هریک از زیر حوضه‌ها، سه پارامتر شماره منحنی، ضریب تلفات و ضریب ذخیره، برای واسنجی استفاده شدند (۴). مطالعه‌ای برای واسنجی HEC-HMS با استفاده از PSO در حوضه آبخیز سد کارده در استان خراسان رضوی انجام شد. نتایج واسنجی نتوانست پارامترهای منحصر به فردی را برای حوضه ارائه دهد (۲).

مهم‌ترین هدف در واسنجی پارامترهای ورودی HEC-HMS، پیدا کردن مقادیر بهینه برای پارامترهای مذکور می‌باشد تا تطابق بیشتر و اختلاف کمتری بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی وجود داشته باشد. از طرفی با توجه به وقت‌گیر و هزینه‌بر بودن روش‌های سعی و خطا، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی به منظور بهینه‌سازی خودکار پارامترهای حوضه‌ها امری ضروری است.

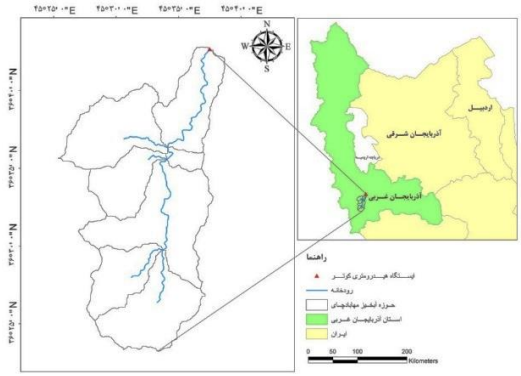
بهینه‌سازی در حوضه‌های فاقد آمار، نیازمند زمان بیشتری برای جستجو در کل فضای مساله است که عملا با روشهای دستی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین منظور بهترین روش، روشی که بصورت خودکار ارتباط بین بهینه‌ساز و HEC-HMS را برقرار کند. یکی از نوآوری‌های این تحقیق، استفاده از نرم‌افزار AutoIt جهت ارتباط خودکار بین HEC-HMS و بهینه‌ساز است. برای این منظور فرایند ارتباط خودکار، در محیط AutoIt کدنویسی شد. الگوریتم‌های بهینه‌ساز (Particle Swarm Optimization) PSO و SA (Simulated Annealing)، جهت بهینه کردن پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب تلفات اولیه (Ia) و زمان تاخیر (Lt) در محیط MATLAB کدنویسی شد.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز مهابادچای یکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه و از سرشاخه‌های اصلی مهابادچای است که در جنوب غربی دریاچه ارومیه قرار دارد. این حوضه با مساحتی در حدود ۴۰۰ کیلومترمربع در مختصات ′۲۵°۴۵ تا ′۳۹°۴۵ طول شرقی و ′۲۳°۳۶ تا ′۴۳°۳۶ عرض شمالی قرار دارد. در خروجی حوضه آبخیز مهابادچای، سد مهاباد است که آب حوضه به آن تخلیه شده و مازاد آن به دریاچه ارومیه می‌ریزد. ایستگاه هیدرومتری کوتر بالادست سد مهاباد و در خروجی حوضه مورد مطالعه قرار دارد. حوضه مهابادچای، ۷ زیرحوضه دارد که در این تحقیق استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز مهابادچای را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، از داده‌های ایستگاه باران‌سنجی پل سرخ مهاباد به عنوان داده‌های بارش و از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری کوتر (دریافت شده از آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی) به عنوان داده-های رواناب حوضه آبخیز مهابادچای استفاده شد. هر دو ایستگاه بارانسنجی و هیدرمتری فقط برای سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ ثبت آمار مشترک داشتند که از بین چهار سال نیز، فقط سالهای ۸۶ و ۸۷ دارای ۹ رخداد بارش–رواناب متناظر بودند. به عبارتی فقط برای دو سال ذکر شده به ازای بارش ثبت شده تاریخ و زمان معین، هیدروگراف ثبت شده وجود داشت. در نهایت، بعد از بررسی‌های لازم از بین ۹ رخداد بارش–رواناب مربوط به سال‌های ۸۶ و ۸۷، رخدادهای ۱۳۸۷/۸/۳ (رخداد ۱)، ۱۳۸۷/۱۲/۱۹ (رخداد ۲) و ۱۳۸۷/۹/۱ (رخداد ۳) برای واسنجی و دو رخداد ۱۳۸۷/۷/۱۰ (رخداد ۴) و ۱۳۸۷/۱۲/۲۴ (رخداد ۵) برای اعتبارسنجی پارامترهای CN، Ia و Lt استفاده شدند.

لازم به ذکر است که حوضه مهابادچای و زیرحوضه‌های آن فاقد آمار مربوط به پارامترهای هیدرولوژیکی است.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز مهابادچای در شمال غرب کشور و استان آذربایجان غربی.

الگوریتم جامعه ذرات (PSO)

این روش الهام گرفته از پرواز هم زمان پرندگان، شـــنای ماهیان و زندگی اجتماعی آن‌ها ا ست. در PSO، تعدادی از ذرات وجود دارند که در فضای جستجوی تابعی که بهینه می‌گردد، پخش شده‌اند. هر ذره، نماینده یک جواب ممکن ا ست. در هر لحظه، هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تاکنون در آن قرار گرفته و بهترین مکانی که در کل همســـایگانش وجود دارد، تنظیم می‌کند (۶).

فرض کنید فضا D بعدی است و iامین ذره از گروه می‌تواند با یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت نمایش داده شود. تغییر موقعیت هر ذره با تغییر در ساختار موقعیت و سرعت قبلی امکان‌پذیر است. اطلاعات هر ذره شامل بهترین مقداری که تاکنون به آن رسیده (Pbest) و موقعیت Xi است. این اطلاعات از مقایسه تلاش‌هایی که هر ذره برای یافتن بهترین جواب انجام می‌دهد، حاصل می‌شود. همچنین هر ذره بهترین جوابی را که تاکنون در گروه از مقدار Pbest ها به دست آمده، به عنوان (Gbest) می‌شناسد. اگر موقعیت ذره i با بعدj را توسط پارامتر P_{ij} و سرعت آن را توسط V_{ij} نشان داده و بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به دست آورده است با $Pbest_{ij}$ و بهترین موقعیتی که توسط ذرات به دست آمده است با $Gbest_{ij}$ نشان داده شود، هر ذره برای رسیدن به بهترین جواب موقعیت خود را با استفاده از روابط ۱ و ۲ تغییر می‌دهد:

$$V_{ij}(t) = W * V_{ij}(t-1) + c_1 * r_1 * \left(Pbest_{ij} - P_{ij}(t-1)\right) + c_1 * r_2 * (Gbest_{ij} - P_{ij}(t-1)) \quad (۱)$$

$$P_{ij}(t) = P_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \quad (۲)$$

که در آن، w ضریب اینر سی ا ست که روی هم‌گرایی الگوریتم PSO تاثیر مستقیم دارد. بهتر اســت مقدار w در مراحل ابتدایی، یک مقدار بزرگ در نظر گرفته شــود تا یک جســتجوی کامل و ســراســری در فضــای جســتجو انجام شــود. ســپس در طی مراحل اجرای الگوریتم، مقدار w به تدریج کاهش داده می‌شـــود تا الگوریتم به مرز هم‌گرایی نزدیک شـــود و جواب‌های دقیق‌تری به دســـت بدهد. r_1 و r_2 اعداد ت صادفی در بازه (۱و۰) با توزیع یکنواخت ه ستند که تنوع در جواب‌ها را به وجود آورده و منجر به ج ستجوی کامل روی ف ضا می شوند. c_1 ضـریب یادگیری مربوط به تجارب شـخصـی هر ذره، و در مقابل c_2 ضـــریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع اســـت. $V_{ij}(t-1)$ ســـرعت ذره i در تکرار $(t-1)$ام، $V_{ij}(t)$ ســـرعت ذره در تکرار (t)ام، $P_{ij}(t-1)$ موقعیـت ذره i در تکرار $(t-1)$ام و $P_{ij}(t)$ موقعیت ذره در تکرار (t)ام می‌باشد.

برای ذرات تک-بعدی با حرکت غیر تصـــادفی، اگر مقدار $c_1 + c_2$ بین صفر و یک باشد، مسیرهایی که ذرات طی می‌کنند، قابل قبول‌تر می‌با شند (۶). مقادیر پی شنهادی برای پارامترهای الگوریتم عبارتند از: $w =$ ۰/۷۲۹۸، $c_1 = c_2 =$ ۱/۴۹۶۲. در این تحقیق، الگوریتم PSO در MATLAB کدنویسی شد.

الگوریتم سرد کردن فلزات (SA)

ایده الگوریتم SA از عمل سرد کردن تدریجی فلزات برای ا ستحکام بیشـــتر آن‌ها نشـــات گرفته اســـت. الگوریتم SA با یک جواب اولیه تصادفی مانند S در فضای حالت مسئله شروع کرده و با گذر از حالتی به حالت دیگر به جواب بهینه مســـئله نزدیک می‌شـــود. در هر تکرار، یک همســـایگی مانند 's ایجاد می‌کند و بر اســـاس یک احتمال، از جواب s به جواب 's می‌رود و یا اینکه در همان جواب s باقی می‌ماند. این رو ند تا رســـیدن به حداکثر ت عداد تکرار ها ادا مه می یا بد. تابع P(e,e',T) (معادله ۳) تعیین کننده احتمال قبولی حالت همســـایه می‌باشـد. e بهینگی حالت فعلی و'e بهینگی حالت همسایه می‌باشد ($\Delta e = e - e'$). در صورتی که e' < e باشد، تابع P مقدار ۱ می‌گیرد (یعنی احتمال قبولی حالت همســـایه ۱۰۰٪ اســـت). در غیر این صورت (e' < e) تابع P بر ا ساس مقدار T (دما) و اختلاف بین 'e و e مقداری بین صـــفر و یک انتخاب می‌کند که نشـــان دهنده احتمال قبولی حالت همســـایه اســـت. در صـــورتی که حالت همســـایه از حالت فعلی بدتر باشـــد، مقدار پارامتر T تعیین کننده احتمال قبولی جواب می‌با شد. در ابتدا، مقدار T طوری انتخاب می شود که اکثر حالت‌های همســـایه را مورد پذیرش قرار دهد. پارامتر T به تدریج با افزایش تکرارها، کاهش می‌یابد.

$$P(e, e', T) = \exp(-\Delta e/T) \quad (۳۱)$$

برای به‌روز رسانی دما از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$T_{i+1} = \frac{T_i}{1 + \omega T_i} \qquad i = 1,2,\dots,n \quad (۴)$$

که در آن

$$\omega = \frac{T_1 - T_k}{(k-1)T_1 T_k} \quad (۵۱)$$

در روابط فوق، T_{i+1} دمای تکرار $(i+1)$ام، T_i دما در تکرار iام، T_1 دمای اولیه و k تعداد تکرار است. مقدارT باید به گونه‌ای انتخاب گردد که هنگام رسیدن به دمای صفر، الگوریتم از بهینگی‌های محلی عبور کرده و در نزدیکی بهینگی سراسری قرار گرفته باشد. در الگوریتم SA انتخاب دما نقش بسیار زیادی در موفقیت الگوریتم دارد. انتخاب دمای اولیه بسیار بزرگ موجب کندی الگوریتم و گسترش فضای جستجو و

انتخاب دمای کم موجب قرار گرفتن در نقاط بهینگی محلی می‌شود. در این تحقیق، الگوریتم SA در MATLAB کدنویسی شد.

تابع هدف و قیودات

تابع هدف حداقل‌سازی اختلاف بین دبی متناظر هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی. در تحقیق حاضر تابع هدف، ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE[1]) بین دبی‌های (تعداد n دبی) مشاهداتی (Q_{oi}) و محاسباتی (Q_{si}) انتخاب شد (معادله ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \qquad (۶)$$

برای تبدیل تابع هدف به یک حالت بهینه‌تر، قیودی برای آن در نظرگرفته شده است. در همه زیرحوضه‌ها، پارامتر CN بین ۴۰ تا ۹۰ و ضریب تلفات اولیه بین ۰/۱۵S تا ۰/۲۵S در نظر گرفته شد. حد پایین و بالای پارامتر Lt در زیرحوضه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. در تحقیق حاضر به منظور مقایسه دو الگوریتم تعداد تکرارها برای متوقف شدن الگوریتم، یکسان (۱۰۰۰ تکرار) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- محدوده تغییرات زمان تاخیر در زیرحوضه‌ها (دقیقه)

زیر حوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حد پایین	۲۰	۲۰	۵۰	۲۰	۲۰	۲۰	۴۰
حد بالا	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۰۰	۱۳۰	۱۶۰

برای ارزیابی دقت مدل‌های توسعه یافته و اطمینان از صحت نتایج آنها، از ضریب تبیین بین دبی‌های مشاهداتی و دبی‌های پیش‌بینی شده استفاده گردید. هر چه ضریب فوق‌الذکر به یک نزدیکتر باشد، دقت مقادیر پیش‌بینی شده و در نتیجه اعتبار مدل مربوطه بیشتر خواهد شد.

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS 4.1

در تحقیق حاضر، برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و برآورد دبی‌های پیش‌بینی شده از نرم‌افزار HEC-HMS 4.1 استفاده شد که در آن، برای تبدیل بارش مازاد به رواناب، مدل‌های مختلفی وجود دارد. یکی از مهمترین مدل‌ها، مدل SCS است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است. با در دست داشتن هایتوگراف بارندگی و پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه از جمله شماره‌منحنی و زمان تاخیر حوضه می‌توان مقدار رواناب حوضه (دبی پیش‌بینی شده) را بدست آورد.

لینک مدل HEC-HMS با الگوریتم‌های بهینه‌سازی از طریق AutoIt

برای انجام پروژه بهینه‌سازی لازم بود که پارامترهای هیدرولوژیکی که در هر تکرار به طور تصادفی توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تولید می‌شدند، به عنوان ورودی‌های مدل HEC-HMS وارد مدل شده، و مدل براساس این پارامترها، عمل پیش‌بینی هیدروگراف محاسباتی را انجام دهد. به عبارتی در هر تکرار که پارامترهای جدیدی حاصل می‌گردید، باید مدل HEC-HMS نیز راه اندازی می‌شد تا الگوریتم ها واکنش مدل HEC-HMS (هیدروگراف محاسباتی جدید) را با توجه به پارامترهای جدید دریافت و مقایسه می‌نمودند. بنابراین به منظور راه اندازی و پردازش خود کار مدل هیدرولوژیکی نیاز به نرم افزاری بود تا این کار را در هر تکرار به صورت خودکار انجام دهد. در واقع ارتباط بین MATLAB و HEC-HMS با استفاده از نرم‌افزار AutoIt برقرار شد. AutoIt می‌تواند حرکت ماوس و پنجره را به صورت خودکار در محیط ویندوز انجام دهد. مراحل انجام کار توسط AutoIt در محیط آن کدنویسی شد. در کل مراحل بهینه سازی به صورت گامهای زیر است (فرایند انجام کار برای PSO و SA یکسان است):

۱- در هر تکرار، الگوریتمهای PSO و SA (که در نرم افزار MATLAB کدنویسی شده‌اند) مقادیر پارامترهای CN، Ia و Lt را به صورت تصافی تولید می‌کنند.

۲- MATLAB پارامترهای هیدرولوژیکی تولید شده را در فایل متنی، که ورودی مدل HEC-HMS و در برگیرنده مشخصات فیزیوگرافیکی و هیدرولوژیکی هر یک از زیرحوضه‌های آبخیز است، جایگزین پارامترهای CN، Ia و Lt تکرار قبلی می‌کند.

۳- برنامه‌ای که با نرم افزار AutoIt نوشته شده است، از طریق متلب فراخوانی شده و نرم‌افزار AutoIt مدل HEC-HMS را با مقادیر جدید پارامترهای هیدرولوژیکی شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر اجرا می‌کند.

۴- هیدروگراف محاسباتی که با استفاده از پارامترهای هیدرولوژیکی جدید توسط HEC-HMS به دست آمده، توسط AutoIt استخراج شده و در یک فایل متنی ذخیره می‌شود.

۵- هیدروگراف محاسباتی توسط متلب از فایل متنی فراخوانی شده و با هیدروگراف مشاهداتی مقایسه می شود و مقدار RMSE محاسبه می‌شود.

۶- مراحل ۱ تا ۵ تا رسیدن به حداکثر تکرارها (۱۰۰۰)، تکرار می شود و در نهایت کمترین مقدار RMSEی که هر یک از الگوریتم های PSO و SA به آن دست یافته‌اند، به عنوان تابع هدف بهینه و پارامترهای هیدرولوژیکی که باعث حصول کمترین مقدار RMSE گشته‌اند، به عنوان پارامترهای هیدرولوژیکی (CN، Ia و La) بهینه برای هر یک از زیرحوضه‌ها در نظر گرفته می شوند. در نتیجه، بدون داشتن خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه، پارامترهای بهینه مدل هیدرولوژیک بدست می‌آید.

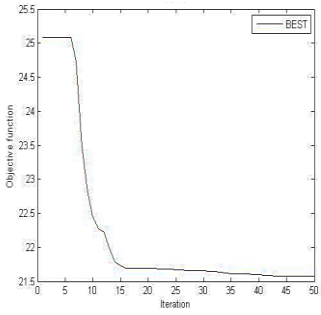
نتایج

همگرایی الگوریتم‌های PSO و SA برای رسیدن به کمینه تابع هدف یعنی RMSE برای مقایسه سرعت همگرایی آن‌ها برای هر یک از رخدادها در شکل‌های (۲) تا (۴) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود الگوریتم PSO برای هر سه هیدروگراف انتخاب شده برای

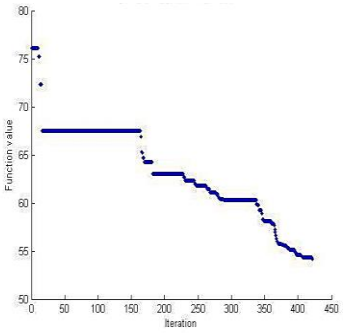
[1] Root Mean Squared Error

واسنجی، مقدار تابع هدف کمتری را در مقایسه با الگوریتم SA بدست آورده است. همچنین تعداد تکرارهای الگوریتم PSO برای رسیدن به بهترین مقدار تابع هدف و به تبع آن پارامترهای بهینه‌تر، کمتر از الگوریتم SA می‌باشد که این امر باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه می‌شود.

الف

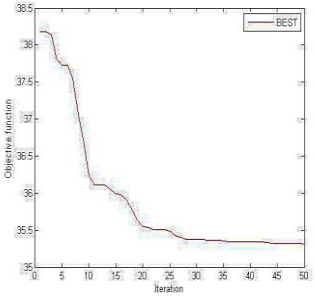


ب

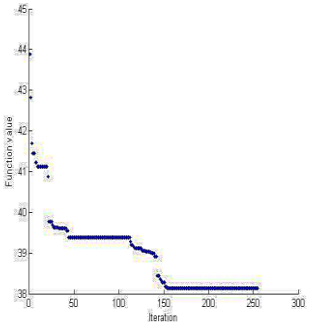


شکل ۲- سرعت همگرایی PSO و SA به مقدار کمینه RMSE برای رخداد ۱۳۸۷/۸/۳. الف) PSO و ب) SA.

الف



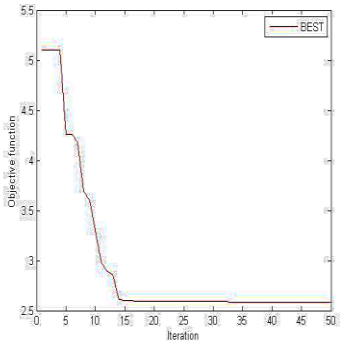
ب



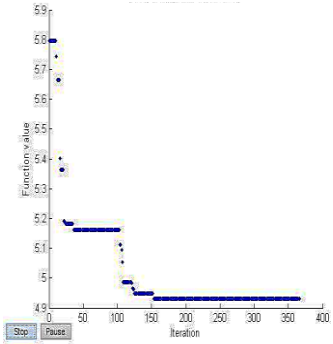
شکل ۳- سرعت همگرایی PSO و SA به مقدار کمینه RMSE برای رخداد ۱۳۸۷/۱۲/۱۹. الف) PSO و ب) SA.

جدول (۲) مقدار تابع هدف (RMSE) بهینه نهایی را که هر کدام از الگوریتم‌ها در نهایت به آن دست یافته‌اند و همچنین ضریب تبیین (R^2) دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی را برای هر یک از رخدادهای واسنجی به تفکیک الگوریتم بهینه، نشان می‌دهد. مقادیر بهینه شده پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر در هر یک از زیرحوضه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

الف



ب



شکل ٤- سرعت همگرایی PSO و SA به مقدار کمینه RMSE برای رخداد ۱۳۸۷/۷/۱۰. الف) PSO و ب) SA.

جدول ۲- تابع هدف بهینه و ضریب تبیین بین دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی.

الگوریتم	هیدروگراف	۱	۲	۳
PSO	RMSE	۲۱/۵۷	۳۵/۳۲	۲/۵۸
	R^2	۰/۳۲	۰/۶۶	۰/۹۷
SA	RMSE	۵۴/۱۷	۳۸/۱۳	۴/۹۳
	R^2	۰/۳۵	۰/۵۸	۰/۸۹

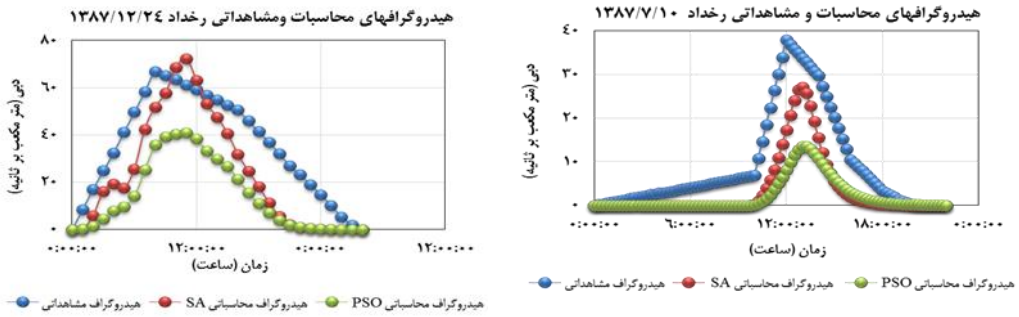
پارامترهای پیش‌بینی از نظر صحت، زمانی دارای اعتبار هستند که صحت و قابلیت پیش‌بینی توسط این پارامترها در دوره اعتبارسنجی با مقدار خطای قابل قبول اثبات شود. در ادامه، اعتبارسنجی پارامترهای بهینه استخراج شده شامل شماره‌منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر در زیرحوضه‌های مورد بررسی، با استفاده از داده‌های بارش–رواناب مربوط به دو رخداد که در مرحله واسنجی استفاده نشده بودند، انجام شد.

برای مقایسه نمودارهای دبی محاسباتی و مشاهداتی، هیدروگراف شبیه‌سازی شده با HEC-HMS با استفاده از پارامترهای بهینه بدست آمده از مرحله واسنجی، به همراه هیدروگراف مشاهداتی آن واقعه رسم شد (شکل ۵). همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد، هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده با استفاده از پارامترهای بهینه الگوریتم

SA نسبت به PSO، با هیدروگراف مشاهداتی برازش بهتری داشته است. با این حال، برای هر دو رخداد مقدار دبی‌های پیش‌بینی شده کمتر از دبی‌های مشاهداتی است. به عبارتی مقدار پارامترهای بهینه‌سازی شده به وسیله هر دو الگوریتم، مقدار دبی‌ها را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند؛ هرچند که مقادیر SA به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشند.

جدول ۳- مقدار پارامترهای بهینه شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر برای هریک از زیرحوضه‌ها

	پارامتر بهینه	مقدار اولیه	PSO1	SA1	PSO2	SA2	PSO3	SA3
زیر حوضه ۱	CN	۸۰	۴۰	۸۶/۲	۴۰	۸۴/۶	۶۳	۸۵/۳۴
	Ia	۱۲/۷۳	۱۶	۱۴/۳	۹/۵	۱۵/۸	۱۶	۱۵/۲۴
	Lt	۷۷/۲	۱۴۰	۷۵/۷	۲۰	۸۲	۱۱۰/۴۴	۷۲/۳۴
زیر حوضه ۲	CN	۸۴/۵	۴۰	۸۸/۸	۷۱/۰۷	۷۷/۶	۸۳/۳۵	۹۰
	Ia	۹/۳	۱۲	۱۱/۹	۱۲	۱۲	۶/۵	۶/۵
	Lt	۷۸/۵	۱۴۰	۹۱/۷	۱۴۰	۸۰/۷	۲۵/۶۶	۷۲/۴۶
زیر حوضه ۳	CN	۸۱/۷	۴۰	۵۰/۹	۴۰	۷۷/۴	۸۹/۲۵	۷۵
	Ia	۱۱/۳	۱۴/۵	۱۴	۱۴/۵	۱۴/۲	۱۴/۵	۱۰/۴۸
	Lt	۱۰۸/۴	۱۴۰	۱۰۵	۱۴۰	۹۷/۲	۱۴۰	۱۰۷/۱۹
زیر حوضه ۴	CN	۸۰/۵	۹۰	۶۶/۳	۹۰	۷۱/۲	۶۷/۴۷	۷۷/۷۴
	Ia	۱۲/۳	۹	۱۰	۹	۱۳	۱۵/۵	۹/۹۷
	Lt	۶۵/۶	۵۲/۲۳	۵۲/۳	۱۳۰	۶۷	۲۰	۵۴/۸
زیر حوضه ۵	CN	۷۹	۴۰	۸۶/۲	۴۰	۷۶/۱	۵۶/۲	۸۷/۲۷
	Ia	۱۳/۴۵	۱۷	۱۱/۴	۱۷	۱۶/۹	۱۳/۷۲	۱۷
	Lt	۳۸/۸	۱۰۰	۴۷/۱	۱۰	۴۱/۵	۲۳/۵۷	۶۹/۹
زیر حوضه ۶	CN	۸۳/۷	۷۰	۶۷/۱	۴۰	۷۱/۳	۹۰	۷۷
	Ia	۹/۹	۷/۵	۷/۸	۱۲/۲۳	۱۱/۵	۷/۵	۱۱/۴۸
	Lt	۶۷/۹۳	۱۳۰	۷۲/۶	۱۳۰	۶۶/۴	۱۳۰	۶۶/۵۷
زیر حوضه ۷	CN	۸۲/۳	۴۰	۸۷	۹۰	۸۵/۷	۹۰	۸۹/۷
	Ia	۱۰/۹	۱۴	۱۳/۹	۱۴	۱۳/۸	۹/۳	۱۴
	Lt	۹۷/۸	۱۶۰	۱۰۱	۱۶۰	۱۰۴/۵	۱۶۰	۹۵/۲۳



شکل ۵- هیدروگراف‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای اعتبارسنجی پارامترهای هیدرولوژیکی بهینه.

در ادامه ضریب تبیین بین دبی‌های مشاهداتی و دبی‌های پیش‌بینی شده با استفاده از مقدار پارامترهای بهینه بدست آمده از طریق الگوریتم های PSO و SA، برای رخداد بارش-رواناب تاریخ ۱۳۸۷/۱۲/۲۴، به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۸۲ و برای رخداد تاریخ ۱۳۸۷/۷/۱۰، برای هردو الگوریتم ۰/۸۵ به دست آمد. ضریب CORR در هر دو رخداد برای الگوریتم PSO و SA یکسان می‌باشد. با توجه به نتایج، کارایی الگوریتم SA نسبت به PSO مشهود می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از الگوریتم‌های PSO و SA در بهینه‌سازی پارامترهای ورودی هیدروگراف SCS در HEC-HMS شامل شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر مربوط به هریک از زیرحوضه‌ها استفاده شد. پس از تعیین مقادیر اولیه و حد بالا و پایین پارامترها برای هر یک از هفت زیرحوضه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور واسنجی پارامترها استفاده شد. الگوریتم‌های PSO و SA در محیط MATLAB و

فرایند انجام کار در AutoIt کدنویسی شد. در مرحله واسنجی، هیچ یک از الگوریتم‌های PSO و SA نتوانستند مقادیر منحصر به‌فردی از پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تاخیر را برای حوضه آبخیز مهابادچای ارائه دهند. نتایج به دست آمده از هریک از رخدادها نشان داد که پارامترهای به دست آمده از الگوی مشابهی پیروی نکرده و از یک رخداد به رخداد دیگر متفاوت است که با نتایج (۴) و (۲) مطابقت دارد.

نتایج نشان داد که الگوریتم PSO نسبت به SA با تعداد تکرار کمتری، به مقدار بهینه تابع هدف می‌رسد و باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم می‌شود.

برای رخدادهایی که اختلاف دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی بیشتر بوده است، الگوریتم PSO به لحاظ داشتن هوش جمعی، توانسته است با تعداد تکرارهای کمتر نسبت به الگوریتم SA، مقادیر نزدیک حد بالا و یا حد پایین پارامترهای CN، Ia و Lt را به عنوان پارامترهای بهینه بدست آورد. در حالی که الگوریتم SA مقدار پارامترهای بهینه را در محدوده‌ای نزدیک به مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولوژیکی به دست آورده است.

مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در مرحله اعتبارسنجی نشان داد که دبی‌های هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده با استفاده از پارامترهای بهینه بدست آمده از طریق الگوریتم SA نسبت به PSO، با هیدروگراف مشاهداتی اختلاف کمتری داشته و الگوریتم SA نتایج بهتری نسبت به الگوریتم PSO حاصل نموده است. در نتیجه، استفاده از الگوریتم SA برای محاسبه پارامترهای بهینه، پیشنهاد می‌شود.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: کاظم شاهوردی، هیراد عبقری، اکبر فرضی بلاغی؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: کاظم شاهوردی، هیراد عبقری، اکبر فرضی بلاغی؛ نظارت و نگارش نهایی: کاظم شاهوردی، هیراد عبقری.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است

References

1. Ebrahimiyan, S. and Ghaderi, J. (2014). Evaluation and Calibration of the HEC-HMS/WMS model in Mahabad dam's basin. Irrigation and Water Engineering, 4(4), 70-80.
2. Garmei, R. 2015. Comparing PSO Algorithm Automatic Calibration and Nelder&Mead Algorithm on the HEC-HMS Hydrologic Model (Case Study: Kardeh Watershed). Journal of Water and Soil Conservation, 22(5), 247-260. [In Persian].
3. Gupta, H.V., S. Sorooshian and P. O. Yapo. 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models, comparison with multi-level expert calibration. Hydrologic Engineering, 4(2): 135-143.
4. Kamali, B., and Mousavi, S. J. 2012. Automatic Calibration of Hydrologic Event-Based Model Using PSO Meta-Heuristic Algorithm. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 44(1), 77-88. [In Persian].
5. Razi, M. 2016. Identification of 1190 illegal wells in Hamadan and Bahar plain were identified. Khabaronline News Agency, available at: www.khabaronline.ir. Accessed on 25 August 2020. [In Persian].
6. Kennedy, J. 1998. The behavior of particles, Porto, V. W., Saravanan, N., Waagen, D., and Eiben, A. E. (eds.), In: Evolutionary Programming VII, Springer, 581-590.
7. Mohamad Reza Pour, O., Haghighatjou, P., and zeynali, M. 2016. Compression of Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm models for Optimizing Coefficients of Sediment Rating Curve in estimation of Suspended Sediment in Sistan River; Case Study Kohak station.. Irrigation and Water Engineering, 6(2), 76-89.
8. Shahverdi, K., and M.V.Samani, J. 2010. Automated Simulation of Basin Characteristics Using HEC-HMS, Genetic Algorithm, and AutoIt on Observed Hydrograph Properties. Iran-Water Resources Research, 6(3), 96-99. [In Persian].