

## Evaluation of SWAT model by combining PSO evolutionary algorithm and Taguchi method

Hossain Shirani<sup>1</sup>, Ania Asadi<sup>2</sup>, Somayeh Sadr<sup>3\*</sup>, Ali Asghar Besalatpour<sup>4</sup> and Isa Esfandiarpour<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

<sup>2</sup> MSc Graduated, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

<sup>3</sup> Research Assistant, Pistachio Research Center, Horticulture Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran

<sup>4</sup> Senior Researcher, Institute of Resource Management, Berlin, Germany

<sup>5</sup> Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

Received: 03 May 2023

Accepted: 20 August 2023

### Extended abstract

#### Introduction

SWAT model is a suitable tool for simulating hydrological processes. This model requires many inputs that often cannot be measured directly and is considered one of the main sources of uncertainty in these models. The recalibration process can reduce the uncertainty in the model results by adjusting and adapting these inputs. The researches showed that calibrating a hydrological model by using the common automatic CV calibrating algorithms will not provide proper accuracy in the prediction of hydrological variables during the validation period, so PSO algorithm was used to calibrate the SWAT model. Since there is no mathematical and logical rule to determine the best combination of PSO algorithm parameters and these combinations are selected based on trial and error and among many different combinations, therefore trial and error based methods are very time-consuming and sometimes impossible. In this research, Taguchi method was used to determine the best combination of PSO algorithm parameters.

#### Materials and methods

In this research, the ability to use the SWAT model to simulate monthly runoff in the Javanmardi Watershed, one of the main sub-basins of the Lordegan Watershed with an area of 380 square kilometers, was investigated. In this study, the PSO algorithm parameters, including the number of simulations (A), the number of repetitions (B), the speed calculation weight (C) and the movement parameter (D), were defined in four levels. Then, these parameters were designed and implemented according to the experiments in the L16 orthogonal array (using the Taguchi experiments design method). The performance scale used to evaluate the algorithms was RPD (Relative Percentage Deviation). Considering the variable nature of the response in this study, the S/N index "the lower the better" was used to analyze the Taguchi test results. The selection of arrays and calculations were done in Minitab 16 software.

#### Results and discussion

In the sensitivity analysis stage, which was performed before the model recalibration, among the 28 parameters studied in this research, the model showed sensitivity to the changes of 22 parameters, and they were identified as variables influencing the simulation of runoff in Javanmardi Watershed. The results showed that the parameter of the runoff curve number (CN) is the most important factor and the parameters of soil apparent density in the wet state (SOL\_BD) and average water usable by the plant (SOL\_AWC) are among the most important factors controlling the flow rate in the study basin, respectively. Based on the results simulated by the PSO algorithm, it was found that the SWAT model has an acceptable accuracy for estimating the monthly runoff in the study area. So, in the recalibration phase, the r-factor and p-factor indices were 1.23 and 0.88, respectively, and the explanatory and Nash-Sutcliffe coefficients were 0.77 and 0.75, respectively. In the validation stage, the r-factor and p-factor indexes were 1.31 and 0.84, respectively and the explanatory and Nash-Sutcliffe coefficients were 0.72 and 0.73, respectively. In this study, the best combination resulting from the application of Taguchi method for the parameters of the number of

\* Corresponding author: 2716sadr@gmail.com

simulations, the number of repetitions, the speed calculation weight and the appropriate parameters in the PSO algorithm were determined as 40, 100, 0.2 and 0.15 respectively (A4B4C4D3).

### **Conclusion**

The results show that the SWAT model has an acceptable accuracy for estimating the monthly runoff in the Javanmardi Watershed, and the PSO method is an effective algorithm in calibrating and determining the uncertainty of the model in this basin, and the use of the Taguchi test design method is a suitable way to determine the best combination of PSO algorithm parameters is for researchers who use this method to optimize the SWAT model.

**Keywords:** Javanmardi watershed, Particle swarm algorithm, Simulation, Uncertainty

Cite this article: Shirani, H., Asadi, A., Sadr, S., Besalatpour, A.A., Esfandiarpour, I., 2024. Evaluation of SWAT model by combining PSO evolutionary algorithm and Taguchi method. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 135-153.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## واسنجی مدل SWAT با تلفیق الگوریتم تکاملی PSO و روش تاگوچی

حسین شیرانی<sup>۱</sup>، انیس اسدی<sup>۲</sup>، سمیه صدر<sup>۳\*</sup>، علی اصغر بسالت پور<sup>۴</sup> و عیسی اسفندیارپور<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

<sup>۳</sup> استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران

<sup>۴</sup> پژوهشگر ارشد موسسه مدیریت منابع برلین، آلمان

<sup>۵</sup> استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

مدل SWAT، یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی است. این مدل به ورودی‌های زیادی نیاز دارند که غالباً به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند و یکی از اصلی‌ترین منابع عدم قطعیت در این مدل‌ها محسوب می‌شود. فرایند واسنجی می‌تواند با تعدیل و تطبیق این ورودی‌ها موجب کاهش عدم قطعیت در نتایج مدل شود. پژوهش‌ها نشان دادند که واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی با استفاده از الگوریتم‌های متداول واسنجی خودکار رزومه، دقت مناسبی در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در دوره اعتبارسنجی به وجود نخواهد آورد. لذا، به منظور واسنجی مدل SWAT از الگوریتم PSO استفاده شد. از آنجا که هیچ قانون ریاضی و منطقی برای تعیین بهترین ترکیب پارامترهای الگوریتم PSO وجود ندارد و این ترکیب‌ها به اساس آزمون و خطا و از میان ترکیب‌های بسیار متنوع انتخاب می‌شوند، لذا، روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا بسیار وقت‌گیر و گاهی غیرممکن است. در این پژوهش، از روش تاگوچی برای تعیین بهترین ترکیب حاصل از پارامترهای الگوریتم PSO مورد استفاده قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، قابلیت استفاده از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه در حوزه آبخیز جوانمردی، از زیرحوضه‌های اصلی حوزه آبخیز لردگان با مساحت ۳۸۰ کیلومتر مربع بررسی شد. در این پژوهش، پارامترهای الگوریتم PSO شامل تعداد شبیه‌سازی (A)، تعداد تکرار (B)، وزن محاسبه سرعت (C) و پارامتر حرکت (D)، در چهار سطح تعریف شدند. سپس این پارامترها، مطابق آزمایش‌های موجود در آرایه متعامد  $L_{16}$  (با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی)، طراحی و اجرا شدند. مقیاس عملکردی مورد استفاده برای ارزیابی الگوریتم‌ها، RPD (درصد انحراف نسبی) انتخاب شد. با توجه به ماهیت متغیر پاسخ در این پژوهش، برای تحلیل نتایج آزمایش تاگوچی از شاخص S/N "هرچه کمتر، بهتر" استفاده شد. مرحله انتخاب آرایه‌ها و محاسبات در نرم‌افزار Minitab 16 انجام گرفت.

\* مسئول مکاتبات: 2716sadr@gmail.com

## نتایج و بحث

در مرحله تحلیل حساسیت که پیش از واسنجی مدل انجام شد، از میان ۲۸ پارامتر مورد بررسی در این پژوهش، مدل نسبت به تغییرات ۲۲ پارامتر حساسیت نشان داده و به‌عنوان متغیرهای اثرگذار بر شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز جوانمردی مشخص شدند. نتایج نشان داد که پارامتر عدد منحنی رواناب (CN)، مهمترین عامل و پارامترهای جرم مخصوص ظاهری خاک در حالت مرطوب (SOL\_BD) و متوسط آب قابل استفاده به‌وسیله گیاه (SOL\_AWC) به‌ترتیب در زمره مهمترین عوامل کنترل‌کننده دبی جریان در حوضه مطالعاتی هستند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده به‌وسیله الگوریتم PSO مشخص شد که مدل SWAT دقت قابل قبولی برای برآورد رواناب ماهانه در منطقه مورد مطالعه دارد. به‌طوری‌که در مرحله واسنجی شاخص‌های r-factor و p-factor به‌ترتیب ۱/۲۳ و ۰/۸۸ و ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف نیز به‌ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۵ بودند. در مرحله اعتبارسنجی نیز شاخص‌های r-factor و p-factor به‌ترتیب ۱/۳۱ و ۰/۸۴ و ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف نیز به‌ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۷۳ بودند. در این پژوهش، بهترین ترکیب حاصل از کاربرد روش تاگوچی برای پارامترهای تعداد شبیه‌سازی، تعداد تکرار، وزن محاسبه سرعت و پارامترهای مناسب در الگوریتم PSO به‌ترتیب ۴۰، ۱۰۰، ۰/۲ و ۰/۱۵ (A4B4C4D3) تعیین شد.

## نتیجه‌گیری

نتایج گویای این است که مدل SWAT، دقت قابل قبولی برای برآورد رواناب ماهانه در حوزه آبخیز جوانمردی داشته، روش PSO الگوریتم موثری در واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل در این حوضه بوده است. همچنین، استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تاگوچی، راهی مناسب برای تعیین بهترین ترکیب پارامترهای الگوریتم PSO برای محققانی است که از این روش برای بهینه‌سازی مدل SWAT استفاده می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ازدحام ذرات، عدم قطعیت، شبیه‌سازی، حوزه آبخیز جوانمردی

## مقدمه

فیزیکی استفاده شده است (Besalatpour et al., 2012). مدل<sup>۱</sup> SWAT یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مراتع و اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی است (Ficklin et al., 2009؛ Ghaffari et al., 2010).

مدل‌هایی مانند SWAT، به ورودی‌های زیادی نیاز دارند که بسیاری از آن‌ها به‌صورت مستقیم به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز بزرگ، قابل اندازه‌گیری نیستند و با استفاده از روابط گوناگون به‌دست آورده می‌شوند. به همین علت، یکی از اصلی‌ترین منابع عدم قطعیت در این مدل‌ها عدم قطعیت ناشی از پارامترهای ورودی مدل است. فرایند واسنجی می‌تواند با تعدیل و تطبیق این ورودی‌ها موجب کاهش عدم قطعیت در نتایج مدل شود (Yang et al., 2008). طی این فرایند، تخمین اولیه پارامترهای مدل

طی چند دهه اخیر، فرسایش خاک به‌عنوان خطری جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده محسوب شده است (Morgan and Nearing, 2011؛ Singh et al., 2012). یکی از عوامل مهمی که موجب فرسایش خاک می‌شود، وجود رواناب و دبی‌های سیلابی است که سبب تخریب و هدررفت خاک سطحی در اراضی منابع طبیعی و کشاورزی و سبب ورود رسوب، عناصر غذایی و آفت‌کش‌ها به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده و باعث کاهش کیفیت منابع آب می‌شود (Morgan and Nearing, 2011؛ Yang et al., 2009).

امروزه در بسیاری از نقاط دنیا به علت عدم وجود امکانات کافی و نیز کمبود اطلاعات و آمار در زمینه رواناب و رسوب و مدیریت حوزه آبخیز از مدل‌های ریاضی-

<sup>1</sup> Soil and Water Assessment Tool

شبیه‌سازی رواناب و رسوب روزانه در حوزه آبخیز بازفت (یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوزه رودخانه کارون در مرکز ایران) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مقادیر ضرایب  $r$  و  $p$  به‌دست آمده در مرحله واسنجی مدل را به‌ترتیب  $0.125$  و  $0.81$  گزارش کردند. همچنین، مقدار ضرایب  $R^2$  و NS برای مرحله اعتبارسنجی، به‌ترتیب  $0.64$  و  $0.60$  بود. در مرحله شبیه‌سازی رسوب، مقادیر ضرایب  $r$  و  $p$  برای واسنجی مدل به‌ترتیب  $0.69$  و  $0.85$  و برای اعتبارسنجی آن به‌ترتیب  $0.63$  و  $0.80$  بود.

Tang et al., (2021), روش‌های برازش عدم قطعیت متوالی (SUFI-2<sup>۳</sup>)، راه حل پارامتر (ParaSol<sup>۴</sup>)، تخمین عدم قطعیت احتمال تعمیم یافته (GLUE<sup>۵</sup>) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) ادغام شده با نرم‌افزار SWAT-CUP را برای کالیبره کردن مدل SWAT استفاده کردند و حساسیت پارامتر و عدم قطعیت مدل SWAT را در حوزه رودخانه Lancang river (جنوب غربی چین) بررسی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتر نشان داد که چهار روش همگی می‌توانند برای تجزیه و تحلیل حساسیت پارامتر در شبیه‌سازی جریان استفاده شوند. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل نشان داد که روش‌های SUFI-2 و PSO می‌توانند به نتایج رضایت‌بخشی (با ضریب  $P > 0.7$  و ضریب  $R < 1.5$ ) در مقیاس روزانه دست یابند.

یکی از نیازهای اساسی در تعریف یک الگوریتم فراابتکاری (مانند PSO) برای حل یک مساله خاص، انتخاب مناسب پارامترهای الگوریتم است. تعیین پارامترهای این الگوریتم‌ها تاثیر به‌سزایی بر سرعت هم‌گرایی و جواب‌های مساله دارد و باعث کارایی بیشتر الگوریتم در رسیدن به جواب‌های بهینه می‌شود. از آنجا که تا کنون قانون ریاضی مشخصی برای تعیین پارامترهای بهینه برای الگوریتم PSO معرفی نشده است، لذا، از روش‌های مرسوم تنظیم این پارامترها، می‌توان به استفاده

به شکلی تعدیل می‌شود که بهترین برازش بین مقادیر شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و داده‌های مشاهده‌ای موجود، حاصل شود.

واسنجی در واقع حل یک مساله معکوس (مدلسازی معکوس) است که در آن، مدل‌های شبیه‌سازی از خروجی‌های اندازه‌گیری شده، برای برآورد پارامترهای ورودی مدل استفاده می‌کند. مدلسازی معکوس معمولاً برداری از پارامترهای ناشناخته را با کمینه کردن تابع هدف تخمین می‌زند و به این ترتیب مشکلات بهینه‌سازی و عدم قطعیت نتایج مدل را کاهش می‌دهد (Abbaspour, 2011). پس از واسنجی، مدل با عواملی که از طریق واسنجی اصلاح شده‌اند، ارزیابی و اعتبارسنجی می‌شود. چنانچه مدل شبیه‌سازی خوبی در این مرحله داشته باشد، قادر خواهد بود که رخدادهای آینده را نیز به‌خوبی پیش‌بینی کنند. الگوریتم‌ها و روش‌های گوناگونی برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT ارائه شده است. پژوهش‌ها با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی با استفاده از الگوریتم‌های متداول واسنجی خودکار رزومه، دقت مناسبی در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در دوره اعتبارسنجی به وجود نخواهد آورد (Sun et al., 2015).

الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO<sup>۱</sup>)، یکی از جدیدترین روش‌های ارائه شده برای حل مسایل بهینه‌سازی است (Eberhart and Kennedy, 1995). مطالعات متعددی به‌منظور استفاده از الگوریتم PSO در واسنجی مدل SWAT انجام شده است. (Yang et al., 2008) از پنج الگوریتم بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک، PSO، تکامل تفاضلی و سامانه ایمنی مصنوعی) به‌منظور واسنجی پارامترهای مدل SWAT استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم PSO، با تعداد تکرار کمتر، به پارامترهای بهینه‌تر می‌رسد. Besalatpour et al., (2015) نیز پتانسیل استفاده از الگوریتم PSO را برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT به‌منظور

<sup>4</sup> Parameter Solution

<sup>5</sup> Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup> Nash-Sutcliffe

<sup>3</sup> Sequential Uncertainty Fitting

از معدود مطالعاتی که از روش تاگوچی در زمینه تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO استفاده شده است، می توان به مطالعات (Das et al., 2014) اشاره کرد. آن‌ها در پژوهش خود برای تعیین نسبی پارامترهای موثرتر PSO، از آنالیز و تحلیل روابط خاکستری که بر پایه تاگوچی است، استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها، میزان تاثیرگذاری روش پیشنهادی، به منظور انتخاب پارامترهای مطلوب PSO (با در نظر گرفتن کمترین میزان داده‌ها) را نشان داد. این پژوهشگران، همچنین نتیجه‌گیری کردند که پارامتر اندازه جمعیت، نسبت به دو پارامتر دیگر (نوع PSO و مقادیر C) تاثیرگذارتر بود.

میانگین فرسایش سالانه خاک در ایران ۱۶/۵ تن در هکتار در سال و کل تلفات سالانه خاک در ایران حدود ۲/۷ میلیارد تن است (Mohammadi et al., 2021). با توجه به شدت فرسایش موجود در اراضی ایران و اهمیت انتخاب درست پارامترهای الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی مدل SWAT، پژوهش حاضر با هدف استفاده از روش تاگوچی در تنظیم پارامترهای الگوریتم تکاملی PSO در واسنجی مدل SWAT، به منظور پیش‌بینی رواناب در بخشی از اراضی حوزه آبخیز لردگان (استان چهارمحال و بختیاری)، انجام شده است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** زیرحوضه جوانمردی، با وسعت تقریبی ۳۸۰ کیلومتر، یکی از سه زیرحوضه اصلی حوزه آبخیز لردگان است که در استان چهارمحال و بختیاری در مرکز ایران قرار دارد. این منطقه در بین طول‌های  $50^{\circ}$  و  $56'$  تا  $51^{\circ}$  و  $13'$  شرقی و عرض‌های  $31^{\circ}$  و  $23'$  تا  $31^{\circ}$  و  $38'$  شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از دو بخش دشت و ارتفاعات تشکیل شده است که ارتفاع کمینه و بیشینه آن در دشت‌ها و ارتفاعات به ترتیب ۱۷۵۶ و ۲۹۷۰ متر از سطح دریا بوده و متوسط شیب حوضه ۱۸/۴ درصد است. میانگین بارندگی بلندمدت سالیانه در نقاط گوناگون آن ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه بلندمدت اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک

از نتایج حاصل از تحقیقات پیشین و روش سعی و خطا اشاره کرد (Shirani et al., 2015).

نکته قابل تامل این است که در اکثر پژوهش‌های انجام‌شده، استفاده از طرح آزمایش فاکتوریل کامل (FFD)<sup>۱</sup> به جهت جامع بودن آن نسبت به روش‌های مرسوم مذکور، ارجح است. چرا که این طرح، نه تنها می تواند اثر متغیرهای اصلی را بررسی کند، بلکه بررسی تمایلات موجود بین متغیرها را نیز امکان پذیر می‌سازد (Sadr et al., 2020). اما هنگامی که تعداد عوامل و سطوح در هر عامل افزایش می‌یابد، استفاده از یک طرح کامل بسیار وقت‌گیر، گران و گاهی غیرممکن است. برای به حداقل رساندن تعداد آزمایش مورد نیاز، آزمایش‌های فاکتوریل جزئی (FED) توسعه یافته‌اند (Kechagias et al., 2020).

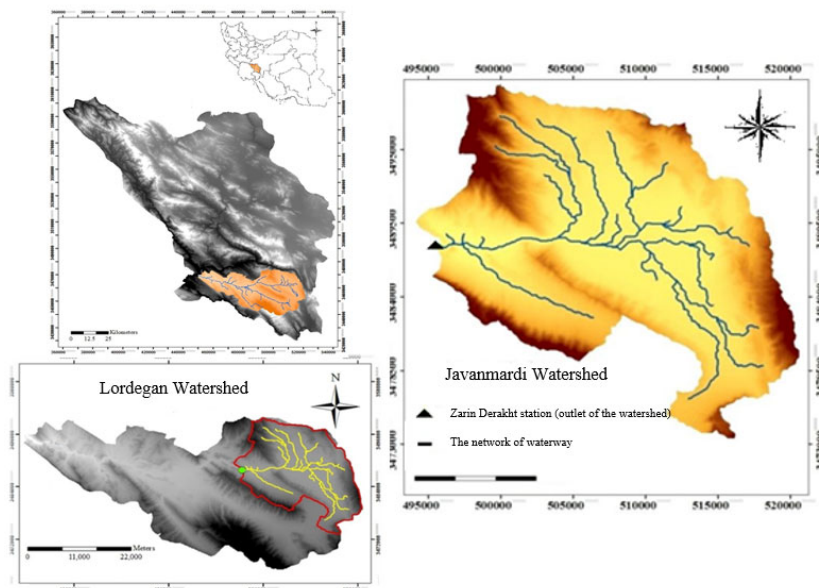
روش تاگوچی، از انواع آزمایش‌های فاکتوریل جزئی محسوب می‌شود که بدون به‌دست آوردن تابع ریاضی، مستقیماً بهینه‌سازی را انجام می‌دهد و به طور قابل ملاحظه‌ای زمان و هزینه انجام آزمایش‌ها را کاهش می‌دهد.

روش تاگوچی شامل دو قسمت طراحی آزمایش و بهینه‌سازی است. تاگوچی با طراحی تعدادی آرایه متعامد به‌عنوان آرایه استاندارد، کار طراحی آزمایش را بسیار کارآمد کرده است. تعداد آرایه‌های متعامد برای آزمایش‌های مختلف بر اساس تعداد سطح و عامل آن آزمایش انتخاب می‌شود (Sadeghi et al., 2012). در روش تاگوچی تشخیص و به‌دست آوردن شرایط بهینه از بین اجراهای آزمایش با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال (S) به نویز (N) انجام می‌گیرد (S/N). سیگنال (S)، عوامل کنترل پذیر و نویز (N)، عوامل کنترل ناپذیر هستند. S/N مشخص می‌کند که شرایط بهینه مربوط به جایی است که در آنجا S/N حداکثر باشد. به عبارت دیگر، در یک آزمایش زمانی شرایط بهینه وجود دارد که ایجاد تغییرات در متغیر هدف بیشتر به تغییرات مقدار سیگنال مربوط تا به مقدار نویز باشد (Taguchi, 1987).

<sup>1</sup> Factorial Experimental Design

بلوط، مرتع و زمین‌های کشاورزی تحت کشت آبی و دیم است. این زیرحوضه از نظر هیدرولوژیک، آبخیز رودخانه خان‌میرزا است.

لردگان، ۱۵/۲ درجه سلسیوس با حداقل و حداکثر به ترتیب ۶/۳ و ۲۳/۳ درجه سلسیوس است. دشت‌های مهم حوضه از نظر کشاورزی، دشت جوانمردی و آلونی خان‌میرزا هستند و پوشش اصلی حوضه شامل جنگل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (زیرحوضه جوانمردی) و ایستگاه زرین درخت در خروجی حوضه

Fig. 1. The location of the studied area (Jovanmardi Watershed) and the Zarin Derakht station at the outlet of the watershed

روزانه از سازمان هواشناسی ایران ([www.irimo.ir](http://www.irimo.ir)) جمع‌آوری شد و ساختار ورودی مدل SWAT در قالب فایل‌های txt آماده شد. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مطابق جدول ۱، است.

**نقشه DEM:** از نقشه DEM برای تعریف محدوده آبخیز و برای تحلیل واحدهای زهکشی سطح زمین استفاده می‌شود. پارامترهای توپوگرافی از قبیل درجه شیب، طول شیب منطقه و خصوصیات شبکه آبراهه از قبیل شیب آبراهه، طول و عرض از نقشه DEM به دست می‌آید. در این پژوهش، از نقشه DEM منطقه با دقت ۲۰ متر (شکل ۲-الف) تهیه شده در سازمان منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، استفاده شد.

**نقشه شبکه جریان:** در مدل SWAT، می‌توان از خودِ مدل، برای ترسیم شبکه آبراهه‌ها استفاده نمود. در ادامه،

**داده‌های ورودی مدل SWAT:** مدل SWAT، از دسته مدل‌های نیمه‌توزیعی بوده که دارای اساس فیزیکی است. به عبارت دیگر مدل SWAT، مدلی فرایند مبنای بوده که می‌تواند با استفاده از چرخه هیدرولوژی و فرموله کردن تمام فرایندهای فیزیکی، جریان را در حوزه‌های آبخیز برآورد نماید. این مدل به وسیله سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده<sup>۱</sup> ارائه شده است (Neitsch et al., 2011) و قادر است با تفکیک یک حوضه به تعداد زیادی زیرحوضه، شبیه‌سازی جزئیات مکانی را انجام دهد. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل SWAT شامل داده‌های اقلیمی، نقشه مدل رقومی ارتفاع<sup>۲</sup>، نقشه شبکه جریان، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک است.

**داده‌های اقلیمی:** داده‌های اقلیمی حوزه آبخیز لردگان شامل بارندگی، بیشینه و کمینه و درجه حرارت، به صورت

<sup>2</sup> Digital Elevation Model (DEM)

<sup>1</sup> United States Department of Agriculture (USDA)

جوانمردی است)، در نظر گرفته و ۴۶ زیرحوضه را در کل منطقه مورد مطالعه مرزبندی کرد. شکل (۲-ب)، نقشه شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها را نش

مدل SWAT با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع و شبکه آبراهه‌ها، حد آستانه ۴۵۰ هکتار را به‌عنوان حداقل سطح زهکشی در حوضه مطالعاتی (که در این مطالعه زیرحوضه آن می‌دهد).

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوزه آبخیز لردگان

Table 1. Characteristics of weather stations in Lordegan Watershed  
Geographical attributes

Station Type	Station type	The length minute-degree	The width minute-degree	Height above sea level (meters)
Synoptic	Synoptic	49-50	30-31	1116
Climatology	Climatology	15-51	17-31	1762
Rain gauge	Rain gauge	03-51	31-23	2034
Rain gauge	Rain gauge	50-59	30-31	1877
Rain gauge	Rain gauge	03-51	31-33	1867
Rain gauge	Rain gauge	50-50	22-31	2057
Rain gauge	Rain gauge	11-51	31-37	2030

پژوهش، به علت عدم وجود نقشه خاک از منطقه مورد مطالعه، از نقشه واحدهای اراضی منطقه به‌عنوان نقشه پایه استفاده شد. برای تکمیل بخشی از اطلاعات خاک مورد نیاز مدل، مانند بافت و ضریب فرسایش‌پذیری و هدایت هیدرولیکی خاک، از نقشه‌های تهیه شده در سایر مطالعات، اطلاعات پروفیل‌های حفر شده و نرم‌افزار SHP استفاده شد و در پایان، نقشه خاک رستری در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد (شکل ۲-د)

**داده‌های هدف:** به‌منظور مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و نیز ارزیابی و بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب لازم است که داده‌های اندازه‌گیری شده جریان (دبی) جمع‌آوری شده و داده‌های شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل نسبت به این داده‌ها مقایسه و ارزیابی شود. بدین منظور از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه زرین درخت استفاده شد. اطلاعات مربوط به این ایستگاه در جدول ۲ ارائه شده است. داده‌های جریان رودخانه به صورت روزانه جمع‌آوری و سپس متوسط دبی ماهانه با میانگین داده‌های روزانه به‌دست آمد.

**نقشه کاربری اراضی:** کاربری اراضی، یکی از عامل‌های مهمی است که بر رواناب، تبخیر و تعرق و فرسایش سطحی در یک حوزه آبخیز اثرگذار است. برای معرفی هر کاربری اراضی به مدل، لازم است که ۴۱ خصوصیت مربوط به هر کاربری در یک فایل به نام Crop در پایگاه داده‌های مدل SWAT وارد شود که این خصوصیت‌ها برای حدود ۱۲۰ پوشش گیاهی مختلف به‌طور پیش فرض در پایگاه اطلاعاتی مدل قرار داده شده است و کاربر در صورت عدم وجود این اطلاعات برای پوشش گیاهی خاصی که در منطقه مطالعاتی مورد نظر وجود دارد، می‌تواند آن‌ها را به این پایگاه اضافه کند که در این مطالعه، پارامترهای مربوط به اراضی لخت و بدون پوشش گیاهی با اصطلاح Rock به پایگاه داده‌های مدل SWAT اضافه شد (شکل ۲-ج).

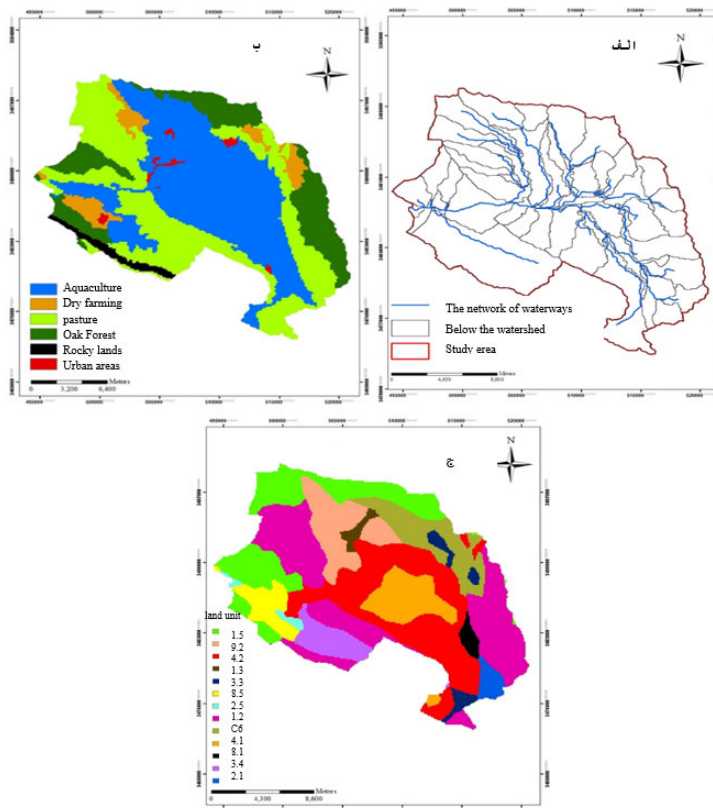
**نقشه خاک:** داده‌های خاکشناسی مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT شامل عمق و ساختمان خاک، حجم درز و ترک، عمق هر لایه خاک، مقدار شن، سیلت و رس، کربن آلی، قابلیت هدایت الکتریکی، تخلخل، رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، جرم مخصوص ظاهری و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک هستند که باید به مجموعه داده مدل وارد گردند (Neitsch et al., 2011). در این



جدول ۲- مشخصات ایستگاه هیدرومتری زرین درخت

Table 2. Characteristics of Zarindarkht hydrometric station

Station name	Station type	Number of statistical years	Height above sea level (meters)	Width minute-degre	Length minute-degre
Zarinderakht	Hydrometry	19	1794	30-31	50-57



شکل ۲- نقشه الف: شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها بر اساس حد آستانه ۴۵۰ هکتار، ب: نقشه کاربری اراضی و ج: نقشه خاک منطقه مورد

مطالعه، استفاده شده برای ساخت مدل SWAT

Fig. 2. A: The network of waterways and watershed based on the threshold of 450 hectares, B: Land use map and C: Soil map of the studied area, used to build the SWAT model

جداسازی HRUها با این فرض انجام می‌شود که هیچ‌گونه واکنشی بین آن‌ها در یک زیرحوضه وجود ندارد. HRUها دارای ویژگی‌های همگنی از خاک، استفاده از اراضی و مدیریت بوده و با روی هم‌اندازی نقشه‌های خاک، شیب و کاربری اراضی ایجاد می‌شوند. تقسیم زیرحوضه‌ها به HRUها، موجب افزایش دقت مدل می‌شود چراکه در این حالت، مدل ابتدا مقدار آب خاک، رواناب سطحی، بار رسوب، رشد گیاه و عملیات مدیریتی را برای هر HRU به صورت جداگانه شبیه‌سازی کرده است و سپس، تعادل آبی

در مرحله بعد، نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به مدل وارد شدند و طبقات شیب نیز به‌وسیله کاربر تعریف شد و با ترکیب آن‌ها واحدهای واکنش هیدرولوژیک<sup>۱</sup> در هر زیرحوضه تولید شد. تعداد HRUها می‌تواند به‌وسیله مقادیر غالب کاربری اراضی، شیب و خاک که به‌وسیله کاربر تعریف می‌شود، تغییر کند. زیرحوضه‌ها یک موقعیت جغرافیایی در حوضه هستند که از نظر مکانی به یکدیگر مربوط بوده و جداسازی و طراحی آن‌ها بر اساس توپوگرافی سطحی انجام می‌شود. این در حالی است که

<sup>1</sup> Hydrological Response Unit (HRU)

می‌کند. تحلیل حساسیت مطلق با ثابت نگه‌داشتن همه پارامترها در مقدار واقعی و تنها با تغییر یک پارامتر در هر مرحله تعیین می‌شود. برای این منظور، ابتدا پارامترهایی از مدل که بر تولید رواناب موثر هستند و در پژوهش‌های گوناگون نیز به‌عنوان پارامترهای حساس معرفی شده‌اند، تعیین شدند. سپس دامنه‌ای از مقادیر برای هر یک از این پارامترها بر اساس مقدار مطلق آن‌ها (که در Absolute فایل مدل SWAT آمده است) تعریف شد. در نهایت، مدل برای هر یک از این پارامترها به‌صورت جداگانه با ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها اجرا شد. به این ترتیب، تاثیر هر پارامتر در میزان رواناب شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل تعیین و پارامترهای حساس شناسایی و مشخص شدند.

**واسنجی:** یکی از اصلی‌ترین منابع عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیک، عدم قطعیت ناشی از پارامترهای ورودی مدل است. از این رو، به‌منظور بهبود نتایج شبیه‌سازی و کاهش عدم قطعیت در نتایج، بیشتر این مدل‌ها نیاز به تطبیق و تعدیل در پارامترهای ورودی و کنترل‌کننده فرایندها در مدل دارند (Abbaspour, 2014). فرایند واسنجی می‌تواند با تطبیق و تعدیل ورودی‌ها موجب کاهش این عدم قطعیت در نتایج مدل شود (Nasiri et al., 2020). مدل SWAT، نیز به‌دلیل بزرگ مقیاس بودن و ورودی‌های زیادی که نیاز دارد و نیز مشکل بودن اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از این پارامترها در مقیاس حوضه‌ای، لازم است که این مدل برای حوزه آبخیز مورد نظر واسنجی شود. روش‌ها و فناوری‌های گوناگونی برای تحلیل عدم قطعیت و واسنجی مدل‌ها وجود دارد. در این پژوهش، پس از تعیین پارامترهای حساس از طریق انجام تحلیل حساسیت، از الگوریتم PSO موجود در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP (Abbaspour, 2011) برای واسنجی مدل استفاده شد. برای انجام واسنجی، نیاز است که نتایج شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای که در ایستگاه خروجی حوزه آبخیز اندازه‌گیری شده است، سنجیده شود.

**الگوریتم PSO:** الگوریتم فراابتکاری PSO، یکی از جدیدترین روش‌های ارائه شده برای حل مسایل بهینه

کل حوضه شبیه‌سازی می‌شود. این امر همچنین امکان توصیف فیزیکی بهتری از موازنه آب در حوزه آبخیز را فراهم می‌آورد (Neitsch et al., 2011).

در گام بعدی، داده‌های اقلیمی به مدل وارد شده و روش مناسب برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس نوع داده‌های اقلیمی در دسترس تعیین شد. در این پژوهش، با توجه به این‌که داده‌های اقلیمی طولانی مدت و پیوسته برای تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد برای حوزه آبخیز مورد مطالعه موجود نبود از روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1985) برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. از روش ماسکینگام (McCarthy, 1938) نیز برای روندیابی جریان استفاده شد. لازم به ذکر است که مدل SWAT به‌منظور بازسازی مقادیر گم شده داده‌های اقلیمی، از مولد داده اقلیمی WGEN استفاده می‌کند. این مولد در پایگاه داده های مدل در یک فایل به نام Wgen.user موجود است و به‌منظور تهیه آن لازم است که از داده‌های یک یا چند ایستگاه موجود در منطقه که دارای آمار بلند مدت و مفقود نشده باشند، ۱۴ پارامتر مربوط به فایل Wgen.user برای ۱۲ ماه سال محاسبه شوند. این محاسبات به‌وسیله نرم‌افزار طراحی شده در محیط اکسل انجام گرفت که می‌توان آن را از سایت اطلاع‌رسانی مدل SWAT تهیه کرد. در گام پایانی، مدل برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه برای یک دوره زمانی ۱۹ ساله با در نظرگرفتن سه سال آموزش برای مدل، اجرا شد.

**تحلیل حساسیت:** تحلیل حساسیت برای تعیین متغیرهای پویا که مدل بیش‌ترین حساسیت را نسبت به آن‌ها دارد، انجام می‌شود. برای این منظور دامنه‌ای از مقادیر برای ورودی‌های خاص به مدل وارد شده و میزان تغییر در مقادیر خروجی مدل بررسی می‌شود. متغیری که تغییرات کم آن موجب تغییرات زیاد در خروجی مدل شود، متغیر حساس محسوب می‌شود. در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت مطلق<sup>۱</sup> (Gan et al., 2014) برای تعیین متغیرهای حساس استفاده شد که میزان تغییر در خروجی را با توجه به تغییر در مقدار ورودی توصیف

<sup>۱</sup> Absolute sensitivity analysis

- (۲) انتخاب سطوح مناسب برای عامل‌ها  
 (۳) انتخاب یک آرایه متعامد (ترکیب‌های مختلف بهینه) برای عوامل کنترل‌کننده  
 (۴) اجرای آزمایش‌ها  
 (۵) تحلیل آزمایش‌ها و پیدا کردن بهترین ترکیب از سطوح عوامل

در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین و منابع موجود (Besalatpour et al., Shirani et al., 2015)، چهار پارامتر الگوریتم PSO در چهار سطح طبق جدول ۳، انتخاب شدند. از آنجا که هدف، بررسی اثر عامل اصلی و انتخاب سطوح بهینه عوامل PSO بر نتایج مدل SWAT بود، تعداد آزمایش‌ها بر طبق رابطه "تعداد سطوح\*تعداد عامل =تعداد آزمایش" باید  $4^4 \times 256$  باشد. اگر قرار باشد تمامی حالت‌های ممکن مورد آزمایش قرار بگیرد، بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است، لذا، بسته به این که چند پارامتر وجود دارد و هر پارامتر دارای چند سطح است، جدولی به نام جدول آرایه‌های متعامد از سری تاگوچی پیشنهاد می‌شود تا به جای انجام آزمایش تمامی حالت‌ها، تنها کسری از حالت‌ها مورد آزمایش قرار گیرند. این جدول نشان می‌دهد که چه تعداد آزمایش باید انجام شود و در هر آزمایش، هر پارامتر در چه سطحی از مقادیر انتخابی باشد. انتخاب آرایه متعامد مناسب، به درجه آزادی آن آزمایش خاص بستگی دارد. برای انتخاب آرایه متعامد مناسب، درجه آزادی آرایه متعامد باید از درجه آزادی کل آزمایش (در این آزمایش برابر ۱۲)، بزرگ‌تر یا مساوی باشد. بر این اساس، از بین جدول‌های پیشنهادی تاگوچی، آرایه متعامد  $L_{16}(4^4)$  به کار برده شد. این آرایه می‌تواند چهار عامل چهار سطحی را در خود جای دهد (جدول ۴). جدول آرایه‌های متعامد با استفاده از نرم‌افزار MINITAB-16 طراحی شد.

سازی است که مبتنی بر هوش جمعی است و تقریب مناسبی از پاسخ بهینه به دست می‌آورد. در واقع این الگوریتم با تنظیم مسیر حرکت یک جمعیت از ذرات در فضای پاسخ مساله بر پایه اطلاعات مربوط به بهترین کارایی پیشین مربوط به هر ذره و بهترین کارایی پیشین مربوط به همسایگان هر ذره، عمل جستجو را در فضای پاسخ انجام می‌دهد. پس هر عضو از جمعیت علاوه بر اینکه دارای یک سرعت انطباقی تغییر مکان هستند که هماهنگ با آن در فضای جستجو حرکت می‌کنند، دارای حافظه نیز هستند. به این معنی که بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به ذهن می‌سپارند. بنابراین، حرکت هر عضو در دو جهت به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو موجود در همسایگی آن‌ها ملاقات کرده است، انجام می‌شود (Kennedy and Eberhart, 1995).

در بهینه‌سازی مدل SWAT به وسیله الگوریتم PSO، عوامل زیادی در سطوح مختلف می‌تواند موثر باشد. در طراحی آزمایش با تغییر دادن عوامل مد نظر از یک مقدار به مقدار دیگر، شرایطی به وجود می‌آید که در خروجی تغییراتی مشاهده شود. سپس، با استفاده از روش‌های تحلیل داده‌های آزمایشی، میزان تاثیر هر یک از عوامل بررسی شده، خروجی برای مقادیر جدید عامل‌ها پیش‌بینی و بهینه‌سازی می‌شود. از آنجایی که خروجی مدل SWAT-CUP به شدت به پارامترهای الگوریتم PSO وابسته هستند، لذا، از روش تاگوچی، به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO استفاده شد. در روش تاگوچی، هدف نهایی پیدا کردن ترکیب بهینه مقدار عوامل قابل کنترل (در این پژوهش پارامترهای الگوریتم PSO) است. به طور کلی، این روش شامل مراحل زیر است (Taguchi, 1987):

(۱) انتخاب عامل‌های کنترل‌کننده

جدول ۳- پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات در چهار سطح

Table 3. Parameters of PSO in 4 levels

Process parameters	Sign	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Number of simulations	A	10	20	30	40
The number of repetitions	B	10	40	70	100
Speed calculation weight	C	0.05	0.1	0.15	0.2
Appropriate parameters	D	0.05	0.1	0.15	0.2

جدول ۴- نمایش آرایه متعامد L16 مطابق با پژوهش حاضر

Table 4. Display of orthogonal array L16 according to the present research

Number test	A	B	C	D	Number test	A	B	C	D
1	1	1	1	1	9	3	1	3	4
2	1	2	2	2	10	3	2	4	3
3	1	3	3	3	11	3	3	1	2
4	1	4	4	4	12	3	4	2	1
5	2	1	2	3	13	4	1	4	2
6	2	2	1	4	14	4	2	3	1
7	2	3	4	1	15	4	3	2	4
8	2	4	3	2	16	4	4	1	3

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

The lower the Better.....

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\mu^2}{R^2} \right] \quad (3)$$

Nominal the Better...

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1/y_i^2) \right] \quad (4)$$

The Larger the Better...

در معادلات بالا،  $y_i$  مقدار متغیر هدف بهایزای  $i$  امین اجرای آزمایش،  $n$  تعداد تکرار آزمایش،  $\mu$  مقدار میانگین و  $R^2$  مقدار واریانس مقادیر متغیر هدف در تکرارهای آزمایش است.

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، در تمامی شرایط بالا، بزرگ‌ترین مقدار S/N بهترین شرایط را دارد (Taguchi, 1987). با توجه به ماهیت متغیر پاسخ در این پژوهش، برای تحلیل نتایج آزمایش تاگوچی از شاخص "هرچه کمتر، بهتر" (رابطه ۴) استفاده شد. مرحله انتخاب آرایه‌ها و محاسبات در نرم‌افزار Minitab 16 انجام گرفت.

**شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل:** فرایند ارزیابی کارایی مدل، نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است (Schaeffli and Gupta, 2007).

به‌طورکلی، شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌ها، معیارهایی ریاضی هستند که برای بیان میزان همخوانی مقادیر شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل با مقادیر مشاهده‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Beven, 2011).

در این پژوهش، از شاخص‌های مرسوم ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب نش-ساتکلیف (NS)، علاوه بر معیارهای  $r$ -factor و  $p$ -factor برای ارزیابی کارایی و دقت مدل SWAT استفاده شد.

در این پژوهش، مقیاس عملکردی مورد استفاده برای ارزیابی الگوریتم‌ها، RPD (درصد انحراف نسبی) انتخاب شد (رابطه ۱) (Behnamian, and Zandieh, 2011).

$$RPD = \frac{|Methodsol - Bestsol|}{Bestsol} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، *Methodsol*، مقدار تابع هدف به ازای هر آزمایش و *Bestsol* بهترین پاسخ در بین تمامی آزمایش‌ها است.

پس از تعیین سطوح عوامل (جدول ۳) و شاخص ارزیابی الگوریتم PSO (RPD)، این سطوح، مطابق آزمایش‌های آورده شده در آرایه متعامد L16 موجود در جدول ۴، در مدل SWAT طراحی و اجرا شدند و مقدار RPD برای هر کدام از آزمایشات ثبت شد. در گام نهایی، سطح بهینه هر یک از پارامترها مشخص شد. در روش تاگوچی تشخیص و به‌دست آوردن شرایط بهینه از بین تیمارهای آزمایش، با استفاده از تحلیل S/N (نویز/سیگنال) انجام می‌گیرد.

عموماً دو دسته عامل برای یک آزمایش وجود دارند: عوامل کنترل‌پذیر (سیگنال) که به‌وسیله کاربر قابل کنترل و تنظیم هستند و عوامل کنترل‌ناپذیر (نویز) که به‌وسیله کاربر کنترل نمی‌شوند. S/N، مشخص می‌کند که شرایط بهینه مربوط به جایی است که در آنجا نسبت سیگنال به نویز بیشینه باشد. به‌عبارت دیگر، در یک آزمایش زمانی شرایط بهینه وجود دارد که ایجاد تغییرات در متغیر هدف، بیشتر به تغییرات مقدار سیگنال مربوط تا به مقدار نویز باشد. معمولاً سه شاخص کیفیت در تحلیل S/N وجود دارد که شامل رابطه (۲)، (۳) و (۴) هستند.

### نتایج و بحث

**نتایج اولیه اجرای مدل SWAT:** در اجرای مدل SWAT، با نقشه کاربری اراضی حال حاضر، حوزه آبخیز مورد مطالعه به ۴۶ زیرحوضه و ۲۲۰ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شد. ایستگاه خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری زرین درخت) نیز در زیرحوضه شماره ۳۱ واقع شد (شکل ۳).

زیرحوضه شماره ۱۲ با مساحت حدود ۹/۴۴ هکتار، دارای کمترین وسعت و زیرحوضه شماره ۴۰ با مساحت حدود ۵۲۱۲/۸ هکتار، دارای بیشترین وسعت در میان ۴۶ زیرحوضه حوزه آبخیز جوانمردی هستند.

**تحلیل حساسیت مدل SWAT به پارامترهای مختلف:** تحلیل حساسیت پیش از واسنجی مدل می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تعیین دامنه تغییرات پارامترها استفاده شود و به کاهش عدم قطعیت در نتایج مدل کمک کند (Arnold et al., 2000).

در مدل SWAT، پارامترهای زیادی بر شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز اثر گذارند که بسیاری از آن‌ها دارای اثر متقابل بر یکدیگر نیز هستند. از میان ۲۸ پارامتر مورد بررسی در این پژوهش، مدل نسبت به تغییرات ۲۲ پارامتر حساسیت نشان داده و به‌عنوان متغیرهای اثرگذار بر شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز جوانمردی مشخص شدند.

نتایج نشان داد که پارامتر عدد منحنی رواناب (CN)، مهم‌ترین عامل است و پارامترهای جرم مخصوص ظاهری خاک در حالت مرطوب (SOL-BD) و متوسط آب قابل استفاده به‌وسیله گیاه (SOL-AWC) به‌ترتیب در زمره مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده دبی جریان در حوضه مطالعاتی هستند. رتبه حساسیت پارامترهای مهم در این پژوهش، در جدول ۵ نشان داده شده است.

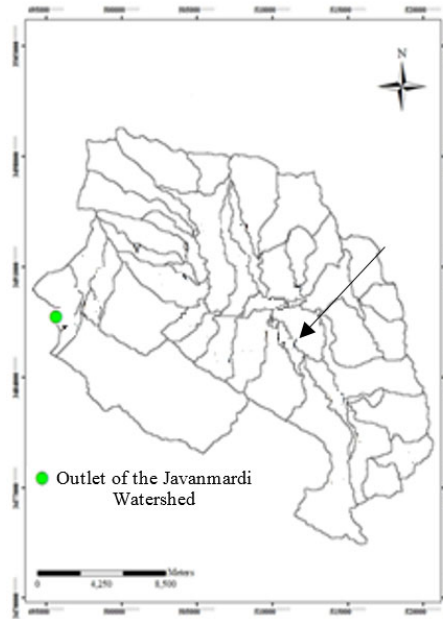
ضریب تبیین ( $R^2$ )، بیان‌کننده توان دوم ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل است. ضریب همبستگی می‌بایست بین ۱- و ۱ قرار گیرد.

در نتیجه  $R^2$  (که توان دوم آن است) بین صفر و یک قرار خواهد داشت. اگر این همبستگی زیاد (نزدیک به یک) باشد، مدل داده‌ها را خوب برازش کرده است، در حالی که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است (Rahman et al., 2013). ضریب نش-ساتکلیف (NS) ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد (Nash and Sutcliffe, 1970).

مقدار عددی ضریب نش-ساتکلیف بین منفی بی نهایت تا یک بوده، هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بیان‌گر آن است که مدل شبیه‌سازی بهتری داشته است. عموماً اگر شاخص نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Ayele et al., 2017؛ Nash and Sutcliffe, 1970).

دو معیار p-factor و r-factor برای کمی کردن و ارزیابی عدم قطعیت استفاده می‌شود. معیار p-factor در صدر قرارگیری داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد و معیار r-factor میانگین ضخامت محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد (فاصله حد بالا و پایین) است.

برای ایجاد برازش مناسب، هدف دستیابی به بیشترین پوشش داده مشاهداتی با کمترین ضخامت نوار عدم قطعیت است. مقادیر p-factor بین صفر و یک و r-factor بین صفر و  $\infty$  است (Abbaspour, 2014).



شکل ۳- موقعیت زیرحوضه‌ها و ایستگاه هیدرومتری زرین‌درخت در خروجی حوزه آبخیز جوانمردی  
**Fig. 3.** The location of the sub-watersheed and the Zarindarkht hydrometric station at the outlet of the Javanmardi Watershed

جدول ۵- رتبه حساسیت پارامترهای مهم در پژوهش حاضر

**Table 5.** The sensitivity rating of important parameters in the present study

Parameter	Symbol	Rank
Runoff curve number for humidity conditions II	CN	1
Apparent density of soil in wet state	SOL_BD	2
Average water available by the plant	SOL_AWC	3
Hydraulic conductivity of soil saturation	SOL_K	4
base current reduction constant	ALPHA_BF	5
Delay time for underground water	GW_DELAY	6
Aquifer permeability coefficient	RCHRG_DP	7
Depth of water threshold in shallow aquifer for return flow	GWQMN	8
Plant absorption compensation factor	EPCO	9
Evaporation compensation factor from soil	ESCO	10
Average slope length	SLSUBBSN	11
Effective hydraulic conduction in the main channel	CH_K2	12
Snowfall temperature	SFTMP	13
Snow melting base temperature	SMTMP	14
The average total monthly rainfall during the forecast period	PCPMM	15
Skewness coefficient for daily rainfall in the month during the forecast period	PCPSKW	16
Standard deviation of daily rainfall in the month during the forecast period	PCPSTD	17
The number of days of rainfall events per month during the forecast period	PCPD	18
The number of wet days in the month after a dry day	PR_W1	19
The number of wet days in the month following a wet day	PR_W2	20
Average minimum air temperature during the forecast period	TMPMN	21
Average maximum air temperature during the forecast period	MPMX	22

al., (2009) پس از تحلیل حساسیت مدل SWAT به پارامترهای موثر بر تولید رواناب برای کل ایران، مجموع ۲۲ پارامتر را به‌عنوان پارامترهای اصلی و حساس معرفی کردند.

تعیین بهترین ترکیب از پارامترهای الگوریتم PSO برای استفاده در مرحله واسنجی: جدول ۶، نتایج

بررسی حساسیت مدل نشان داد که تغییرات در مقادیر عددی پارامترهای PCPD، PR\_W1، PR\_W2 بیشتر روند جریان و میزان اوج جریان را تحت تاثیر قرار داده است، در حالی که تغییرات پارامترهای TMPMN و TMPMX تغییرات اوج جریان و به مقدار کمتر، تغییرات جریان پایه را تحت تاثیر قرار داده است. Faramarzi et

RPD حاصل از اجرای الگوریتم کمتر باشد، عملکرد الگوریتم و کیفیت جواب بهتر است.

حاصل از اجرای مدل SWAT\_CUP با استفاده از سطوح تعریف شده برای هر کدام از عامل های انتخابی الگوریتم PSO را نشان می دهد. هر چه میزان

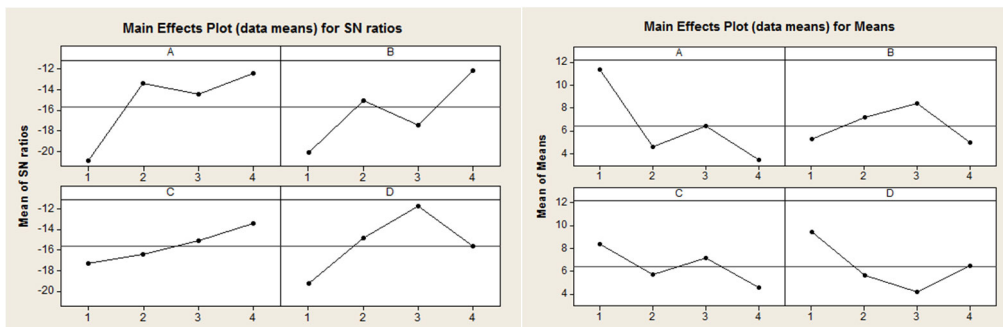
جدول ۶- نتایج حاصل از آزمایش های تاگوچی

Table 6. The results of Taguchi's tests							
Number of test	A	B	C	D	R <sup>2</sup>	RPD (%)	
1	1	1	1	1	0.57	13.63	
2	1	2	2	2	0.58	12.12	
3	1	3	3	3	0.58	12.12	
4	1	4	4	4	0.61	7.57	
5	2	1	2	3	0.66	0	
6	2	2	1	4	0.61	7.57	
7	2	3	4	1	0.60	9.09	
8	2	4	3	2	0.5	1.51	
9	3	1	3	4	0.61	7.57	
10	3	2	4	3	0.65	1.51	
11	3	3	1	2	0.60	9.09	
12	3	4	2	1	0.61	7.57	
13	4	1	4	2	0.66	0	
14	4	2	3	1	0.61	7.57	
15	4	3	2	4	0.64	3.12	
16	4	4	1	3	0.64	3.12	

نمودار باید بیشترین مقدار را داشته باشد، ولی ممکن است برای برخی عوامل (پارامترها) این هماهنگی وجود نداشته باشد. در این صورت در مورد آن عامل نتیجه قطعی و قابل قبولی به دست نیامده است و باید آزمایشات جدیدی طراحی شود تا نتیجه مطلوب به دست آید. با تجزیه و تحلیل های نتایج مشخص شد که سطح A4B4C4D3 حالت بهینه است (جدول ۷).

شکل ۵، نمایانگر نتایج واسنجی مدل SWAT (داده های مشاهده ای و نوار تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد) برای شبیه سازی رواناب در حوزه آبخیز جوانمردی است. در جدول ۸ نیز مقادیر شاخص های واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه سازی رواناب ارائه شده است.

شکل های (۴-الف) و (۴-ب)، بهترین سطح هر یک از پارامترهای الگوریتم PSO را با توجه به محاسبات ارائه شده در جدول ۷ نشان می دهند. در نمودار Mean of Means، برای هر عامل (پارامتر)، مقادیر میانگین تابع هدف برای هر سطح آن نمایش داده شده است. برای هر عامل، بهترین سطح، سطحی است که در آن پارامتر مورد نظر کمترین انحراف را نسبت به بهترین جواب دارد (Bestsol). در نمودار Mean of SN ratios تحلیل برعکس است، بدین معنی که در نمودار اول سطحی که در کمترین مقدار قرار داشت بهتر بود، ولی در این نمودار سطحی که بیشترین مقدار را دارد، سطح مناسب است. در واقع همواره برای شرایط بهینه، مقدار بیشینه S/N مورد نظر است. قاعدتا سطحی که در نمودار اول کمترین است، در این

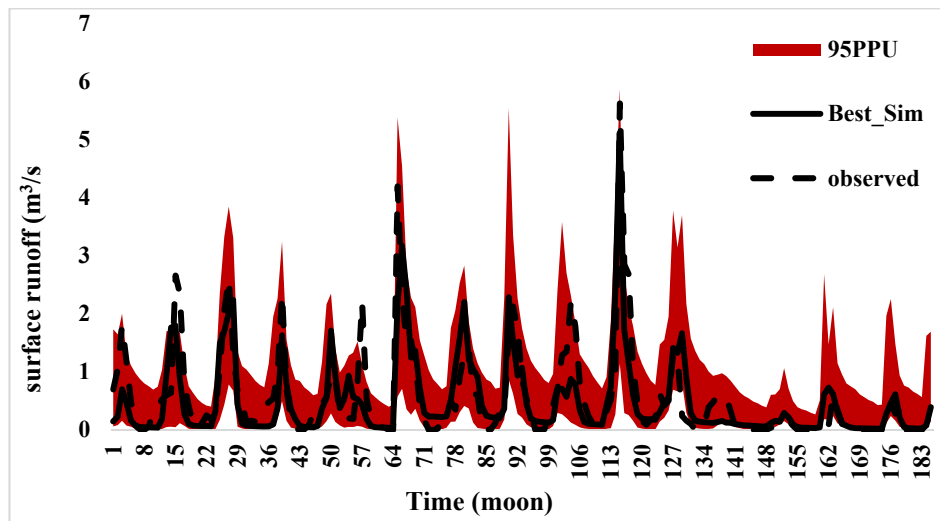


شکل ۴- الف: متوسط میانگین ها برای هر پارامتر در چهار سطح و ب: متوسط نسبت S/N برای هر پارامتر در چهار سطح  
 Fig. 4. A: Average means for each parameter at four levels, B: Average S/N ratio for each parameter at four levels

جدول ۷- سطوح بهینه پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

Table 7. Optimal levels of PSO algorithm parameters

Process parameters	Symbol	Level	Parameter value
Number of simulations	A	4	40
The number of repetitions	B	3	100
Speed calculation weight	C	4	0.2
Appropriate parameters	D	3	0.15



شکل ۵- نتایج واسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز جوانمردی

Fig. 5. SWAT model calibration results using PSO algorithm to simulate runoff in Javanmardi Watershed

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

Table 8. Values of model efficiency evaluation indices in runoff simulation in the calibration and validation stages

	Evaluation index			
	p-factor	r-factor	NS	R <sup>2</sup>
calibration	0.88	1.23	0.75	0.77
Validation	0.84	1.31	0.73	0.72

factor و p-factor که بیان کننده مقدار عدم قطعیت هستند، در مرحله واسنجی، به ترتیب برابر ۱/۲۳ و ۰/۸۸ است، لذا، شبیه‌سازی مدل SWAT در این مطالعه قابل قبول معرفی می‌شود. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، هدف از واسنجی کاهش عدم قطعیت پارامترها است، در نتیجه در واسنجی مدل سعی می‌شود که مقادیر p-factor به یک (۱۰۰ درصد) نزدیک شود. در واقع مقدار مطلوب برای شاخص p-factor هنگامی است که ۱۰۰ درصد داده‌های شبیه‌سازی شده در سطح ۹۵ درصد محدودده اطمینان قرار گیرند و مقادیر r-factor نیز به سمت صفر میل کند (Abbaspour, 2014) ولی معمولاً به دلیل

واسنجی مدل SWAT برای رواناب با استفاده از الگوریتم PSO و پارامترهای منتخب آن به روش تاگوچی: نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که مدل در شبیه‌سازی رواناب توانایی نسبتاً قابل قبولی داشته است. روند تغییرات جریان<sup>۱</sup> به‌ویژه مقدار بیشینه جریان در مرحله واسنجی به خوبی به‌وسیله مدل شبیه‌سازی شده است. مقدار ضریب تبیین نسبتاً بالای داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای (R<sup>2</sup>=۰/۷۷) و نیز ضریب نش-ساتکلیف برابر ۰/۷۵ نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی است (جدول ۸). مقادیر به‌دست آمده برای شاخص‌های r-

<sup>1</sup> Fow dinamic



شد (A4B4C4D3). در این پژوهش، از میان ۲۸ پارامتر مورد بررسی در مطالعات تحلیلی حساسیت مدل SWAT، مدل نسبت به تغییرات ۲۲ پارامتر حساسیت نشان داد که به‌عنوان متغیرهای تاثیرگذار بر شبیه‌سازی رواناب در حوضه مورد مطالعه مشخص شدند و سایر پارامترها به‌عنوان پارامترهای غیرحساس در نظر گرفته شدند و از مرحله واسنجی مدل حذف شدند. در مرحله اعتبارسنجی مدل به‌وسیله الگوریتم PSO با پارامترهای منتخب، شاخص‌های r-factor و p-factor به ترتیب ۱/۲۳ و ۰/۸۸ و ضرایب تبیین و نش-ساتکلیف نیز به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۵ به دست آمدند که گویای این است که مدل SWAT دقت قابل قبولی برای برآورد رواناب ماهانه در حوزه آبخیز جوانمردی داشته، روند تغییرات جریان در مرحله واسنجی به خوبی شبیه‌سازی شده است.

#### نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، راهی مناسب برای تعیین بهترین ساختار و تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO برای محققانی است که از این روش برای بهینه‌سازی مدل SWAT استفاده می‌کنند.

#### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه افرادی که در ارتقای کیفیت مقاله نقش موثری ایفا کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

#### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

خطاهای گوناگون در داده‌برداری و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچ‌گاه این مقادیر برای r-factor و p-factor به دست نمی‌آید. ولی مقادیر r-factor کوچک‌تر و p-factor بزرگ‌تر به ترتیب نشان‌دهنده محدوده عدم قطعیت باریک ضمن پوشش حداکثری داده مشاهداتی در محدوده ۹۵ درصد خواهد بود. بنابراین، با توجه به توانایی خوب مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات جریان و نیز مقادیر به دست آمده شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مرحله واسنجی، به نظر می‌رسد که مدل SWAT برای برآورد رواناب ماهانه در حوزه آبخیز جوانمردی قابل استفاده باشد.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی میزان فرسایش خاک به‌عنوان یک موضوع مهم و تاثیرگذار در زمینه کشاورزی و محیط‌زیست که همواره مورد توجه دولت‌ها بوده است، تمرکز مطالعه حاضر بر یافتن بهترین ساختار الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با به‌کارگیری طراحی آزمایش‌های تاگوچی، به‌منظور واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب است. بدین منظور، ابتدا با بررسی مطالعات گذشته، مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر عملکرد الگوریتم PSO شناسایی شدند. در این آزمایش چهار متغیر تعداد شبیه‌سازی (A)، تعداد تکرار (B)، وزن محاسبه سرعت (C) و پارامترهای مناسب (D) به‌عنوان عوامل تاثیرگذار بر الگوریتم PSO در واسنجی مدل SWAT انتخاب شدند.

با استفاده از انجام آزمایش‌ها بر اساس طراحی تاگوچی، به جای ۲۵۶ آزمایش، با استفاده از ۱۶ آزمایش (آرایه متعامد L<sub>16</sub>)، ترکیب بهینه پارامترهای الگوریتم PSO پیش‌بینی شد. بر این اساس، بهترین ترکیب برای تعداد شبیه‌سازی، تعداد تکرار، وزن محاسبه سرعت و پارامترهای مناسب به ترتیب ۴۰، ۱۰۰، ۰/۲ و ۰/۱۵ تعیین

#### منابع مورد استفاده

- Abbaspour, K. 2014. SWAT-CUP2012: SWAT calibration and uncertainty programs version 5.1-A user manual. Department of Systems Analysis Integrated Assessment and Modelling (SIAM) Eawag Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Duebendorf Switzerland.
- Abbaspour, K. 2011. SWAT-CUP2: SWAT calibration and uncertainty programs version 2: A user manual. Department of Systems Analysis Integrated Assessment and Modelling (SIAM) Eawag Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology Duebendorf Switzerland
- Arnol, J., Mutthiah, R.S., Srinivasan, R., Allen, P. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River Basin. J. Hydrol. 227, 21-40.

- Ayele, G.T., Teshale, E.Z., Yu, B., Rutherford, I.D., Jeong, J., 2017 Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile River Basin Ethiopia. *Water* 9(10), 782.
- Behnamian, J., Zandieh, M., 2011. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop. Scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties. *Expert Syst. Appl.* 38, 14490-14498.
- Besalatpour, A.A., Ayoubi, S.A., Hajabbasi, M.A., Jalalian, A. 2015. Calibration and validation of SWAT model using PSO algorithm for the simulation of runoff and sediment in a mountainous watershed with limited climate data. *Electronic J. Soil Manage. Sustain. Produc.* 4(4), 295-312.
- Besalatpour, A.A. 2012. Modelling of soil erosion hazard in the Bazoft Watershed using fuzzy logic algorithm SWAT model and Fuzzy Clustering-Genetic algorithm. PhD thesis in Soil Science. Faculty of agriculture, Isfahan University of Technology (in Persian).
- Beven, K.J. 2011. *Rainfall-runoff modelling: the primer* 2th. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Das, A., Majurmdar, A., Kr-Das, P. 2014. Detection of apposite PSO parameters using Taguchi based grey relational analysis: optimization and implementation aspects on manufacturing related problem. *Procedia Materials Sci.* 6, 597-604.
- Eberhart, R., Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the MHS'95. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science Nagoya Japan.*
- Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., Yang, H. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrol. Proces.* 23, 486-501.
- Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E., Zhang, M. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 374, 16-29.
- Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, Ch., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao, C., Di, Zh. 2014. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: a case study with a hydrological model. *Environ. Model. Soft.* 51, 269-285.
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., Ahmadi, H., 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood Basin Northwest Iran. *Hydrol. Proces.* 24, 892-903.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appli. Engin. Agri.* 1(2), 96-99.
- Kechagias, J.D., Aslani, K.E., Fountas, N.A., Vaxevanidis, N.M., Manolakos, D.E., 2020. A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy. *Measurement* 151, 107213.
- Kennedy, J., Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV Piscataway NJ: IEEE Press, 1942-1948.*
- McCarthy, G.T. 1938. The unit hydrograph and flood routing. New London Conference North Atlantic Division. US Army Corps of Engineers. New London. Conn. USA.
- Mohammadi, S., Baloueib, F., Hajic, Kh., Khaledi Darvishancand, A., Karydas, C.G. 2021. Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. *Int. J. Digital Earth* 14(8), 1019-1039.
- Morgan, R.P.C., Nearing, M.A. 2011. *Handbook of erosion modelling.* John Wiley & Sons Ltd 413p.
- Nash, J., Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Nasiri, S., Ansari, H., Ziaei, A.N. 2020. Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed (Iran). *Arab. J. Geosci.* 13(11), 1-15.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. 2011. *Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009.* Texas Water Resource Institute USA.
- Rahman, K., Maringantic, H., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K., Lehmann, A. 2013. Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the upper Rhone River Watershed case in Switzerland. *Water Resour. Manage.* 27(2), 323-339.
- Sun, L., Nistor, I., Seidou, O. 2015. Streamflow data assimilation in SWAT model using Extended Kalman Filter. *J. Hydrol.* 531, 671-684.
- Sadeghi, S.H., Moosavi, V., Karami, A., Behnia, N. 2012. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method. *J. Hydrol.* 448, 174-180.
- Sadr, S., Mozafari, V., Shirani, H., Alaei, H., Tajabadi Pour, A., Rajabi Behjat, A. 2020. Control of pistachio endocarp lesion by optimizing the concentration of some nutrients using taguchi method. *Scie. Horticult.* 256, 108575.

- Schaepli, B., Gupta, H.V. 2007. Do nash values have value? *Hydrol. Process.* 21, 2075-2080.
- Shirani, H., Habibi, M., Besalatpour, A.A., Esfandiarpour, I. 2015. Determining the features influencing physical quality of calcareous soils in a semiarid region of Iran using a hybrid PSO-DT algorithm. *Geoderma*, 259, 1-11.
- Singh, R.K., Panda, R.K., Satapathy, K.K., Ngachan, S.V. 2012. Runoff and sediment yield modelling for a Treated hilly watershed in eastern Himalaya using the Water Erosion Prediction Project Model. *Water Resour. Manage.* 26, 643-665.
- Taguchi, G., Konishi, S. 1987. Taguchi methods orthogonal arrays and linear graphs: tools for quality engineering. American Supplier Institute Dearborn Michigan.
- Taguchi, G. 1987. Taguchi design method. *J. Material. Process. Technol.* 184, 233-239.
- Tang, X., Zhang, X., Wang, G., Jin, J., Liu, C., Liu, Y., He, R., Bao, Z. 2021. Uncertainty analysis of SWAT modeling in the Lancang River Basin Using Four Different Algorithms. *Water.* 13(3), 341.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358, 1-23.
- Yang, Q., Meng, F.R., Zhao, Z., Chow, T.L., Benoy, G., Rees, H.W., Bourque, C.P.A. 2009. Assessing the impacts of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. *Agricul. Ecosys. Environ.* 132, 23-31.