



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Rainfall-Runoff Simulation of Malayer Basin Using SWAT and IHACRES Models

Saeed Eskandari¹ and Amin Toranjian^{2*}

¹M.Sc., Department of Soil and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran

²Assist. Professor, Department of Soil and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran

Article information

Received: August 19, 2023

Revised: December 01, 2023

Accepted: December 10, 2023

Keywords:

Efficiency Model

Surface Water

Watershed

Water

Management

Resources

*Corresponding author:

a.toranjian@malayeru.ac.ir



Abstract

Considering the diverse landscape of rainfall-runoff models, a thorough evaluation of their capabilities and limitations is essential for the selection of an optimal model. This study aims to assess the performance of rainfall-runoff hydrological models in the Malayer watershed. In this study, Rainfall-runoff simulation was carried out using SWAT and IHACRES models and meteorological data from 2005 to 2020. The calibration and validation of the model were done using the SUFI-2 algorithm. The results of sensitivity analysis showed that the melting factor, hydraulic conductivity of soil saturation, and snowfall temperature are the most important parameters controlling the flow rate in the study area. The R^2 and NS coefficients for SWAT were calculated as 0.68 and 0.65 in the calibration period and 0.63 and 0.70 in the validation period, respectively which in these results showed the SWAT model has suitable efficiency for estimating the watershed flow. Based on the simulation results of the IHACRES model, the values of R^2 and NS are 0.66 and 0.58 in the calibration period and 0.52 and 0.51 in the validation period, respectively. Considering that the IHACRES model simulates runoff on a daily scale, the efficiency of the model can be evaluated as acceptable.

How to cite this paper: Eskandari, S., & Toranjian, A. (2024). Rainfall-runoff simulation of Malayer basin using models SWAT and IHACRES. . *Environ. Water Eng.*, 10(4), 510-524. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.412444.1886> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** Journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Understanding and predicting the processes of runoff production and subsequent transfer to the outlet point within a watershed are fundamental issues in hydrology. The rainfall-runoff process, which is characterized by its complexity and multifactorial nature, requires a thorough understanding. In-depth knowledge of this process is essential for strategic planning and the holistic management of water resources in the catchment area. In other words, forecasting rainfall and ensuing runoff not only plays a pivotal role in proper watershed management but also significantly contributes to minimizing damages caused by floods and droughts. Hydrological models serve as indispensable tools for analyzing and addressing issues related to the quantity and quality of water resources. Watersheds have different climatic, geographic, and physical characteristics that lead to different water supply requirements in each region. These differing needs depend on the climate and the available water resources. In numerous watershed areas, insufficient information or statistical shortcomings have influenced the accurate assessment of watershed response to rainfall and runoff. The Malayer Dam and surface water resources play pivotal roles in supplying drinking water and supporting agriculture in the region. Changes in land use patterns combined with climate change have led to an increase in severe flooding in recent years, which has caused considerable damage, particularly in the downstream areas of the catchment. This research aims to simulate runoff in the Malayer watershed using SWAT and IHACRES models on both monthly and daily scales, enabling the prediction of flood discharge based on available data. This approach makes it possible to examine the simulated runoff and evaluate the accuracy of the proposed model within the watershed. It serves as a valuable tool for effective flood management in the region.

Material and Methods

The Malayer watershed covers an area of 23959 km² (48.53° to 49.04° E and 33.02° to 33.52° N). The average elevation of the region is 2178.4 m above sea level. As for the climatic situation, this area falls under the category of semi-cold and dry with an Ambrjeh classification. The annual average rainfall in this area is 320.3 mm, and the annual average temperature is 11.7°C. The SWAT

model, a widely adopted continuous time and semi-distributed hydrological model, serves as a robust tool for simulating diverse hydrological processes, water quality dynamics, rangeland management, and the impacts of climate change. Within the SWAT model, the simulation process is based on the hydrological cycle and water balance relationships. Meteorological data such as precipitation, daily minimum and maximum temperatures, wind speed, and relative humidity, as well as land use maps, soil information, and digital elevation model data, are used for the implementation of the SWAT model and the subsequent simulation of runoff in the catchment area. The sensitivity analysis was carried out using the P-value and the T-stat criteria. The model calibration process involves adjusting influential parameters to align model output results as closely as possible with measured values and performance evaluation criteria. To validate data between 2005 to 2014, the SUFI-2 method was used within the SWAT-CUP interface program, incorporating the R-factor and P-factor criteria. The IHACRES rainfall-runoff model is parameter-based and applicable in various climatic zones, including dry and semi-dry areas. In this study, daily input variable statistics were considered for the model. To assess the performance and efficiency of the two models, data from 2015 to 2020 were allocated for the validation phase. Performance evaluation criteria, including R², NS, RMSE, and Bias, were utilized during the calibration and validation periods.

Results

The consequences of the sensitivity analysis revealed that the snow melting factor, hydraulic conductivity of soil saturation, and snow precipitation temperature are crucial parameters influencing runoff flow in the study area. Following the identification of these influential parameters, independent calibration of the SWAT model was conducted using SWAT-CUP software and the SUFI-2 algorithm. Calibration evaluation, based on NS, R², R-factor, and P-factor criteria, yielded values of 0.68, 0.65, 0.28, and 0.24, respectively, indicating the model's adeptness in simulating runoff at this stage (Table 1). In the validation phase, an R² of 0.70 and an NS index of 0.63 were obtained, suggesting a satisfactory match between observed and simulated data during periods of maximum flood flow.

Table 1 Evaluation criteria of SWAT model for the Calibration and validation period

Period	NS	R ²	P-factor	R-factor
Calibration	0.68	0.65	0.24	0.28
Validation	0.63	0.70	0.39	1.03

Additionally, the IHACRES model was recalibrated and validated on a daily scale, yielding calibration NS, R², RMSE, and Bias values of 0.58, 0.66, 2.37, and -0.82, respectively. In the validation stage, these metrics were calculated as 0.51, 0.52, 6.47, and -0.26, respectively (Table 2). While the IHACRES model demonstrated good performance in capturing base flow and short peak discharges, its ability to simulate two maximum flood events during the calibration period was not confirmed. The examination of graphs derived from predictive and observational data indicates the model's relative acceptability. Table 2 Evaluation criteria of IHACRES model for the Calibration and validation period

Period	RMSE	Bias	NS	R ²
Calibration	2.37	-0.82	0.58	0.66
Validation	6.47	-0.26	0.51	0.52

Conclusions

The sensitivity analysis of the SWAT model for the Malayer watershed highlighted the snowmelt factor, soil saturation hydraulic conductivity, and snowfall temperature as critical parameters controlling runoff. Evaluation of the SWAT model, based on NS, R², R-factor, and P-factor

criteria, resulted in values of 0.68, 0.65, 0.24, and 0.28, respectively. In the validation stage, these values were estimated at 0.63, 0.70, 0.39, and 1.03, respectively. The model demonstrated a commendable ability to simulate monthly runoff in the studied area. The IHACRES model's evaluation for daily runoff simulation yielded calibration NS, R², Bias, and RMSE criteria values of 0.58, 0.66, -0.82, and 2.37, respectively. In the validation stage, these metrics were calculated as 0.52, 0.51, -0.26, and 6.47, respectively. Considering the model's relatively low parameter requirement for daily runoff simulation, the results can be considered moderately acceptable.

Acknowledgment

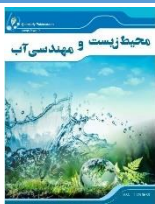
The hydrometer and rain gauge data of this research were received from the Regional Water Company of Hamedan Province and Meteorological Organization of the province, Iran which greatly appreciated.

Data Availability

The data were obtained from the regional water company and the meteorological organization of Hamedan province, and some data used or produced in this research are presented in the graphs or tables of the article.

Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

شبیه سازی بارش - رواناب حوضه ملایر با استفاده از مدل های IHACRES و SWAT

سعید اسکندری^۱ و امین ترنجیان^{۲*}^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی خاک و آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران^۲ استادیار، گروه مهندسی خاک و آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
با توجه به تنوع مدل های بارش-رواناب، بررسی قابلیت ها و محدودیت ها برای انتخاب مدلی مناسب، ضروری است. هدف از این پژوهش، ارزیابی عملکرد مدل های هیدرولوژیکی بارش-رواناب در حوزه آبخیز ملایر می باشد. در این مطالعه، شبیه سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل های SWAT و IHACRES و داده های هواشناسی در طی دوره آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ انجام شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از روش SUFI-2 محاسبه شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد، متغیرهای ذوب برف، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و دمای بارش برف جزء مهمترین متغیرهای کنترل کننده رواناب جریان در حوزه آبخیز مورد مطالعه است. در مدل SWAT، ضرایب NS و R ² در مرحله واسنجی، ۰/۶۸ و ۰/۶۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۶۳ و ۰/۷۰ محاسبه شد که حاکی از کارایی مدل SWAT در برآورد جریان حوضه بوده است. بر اساس نتایج شبیه سازی مدل IHACRES، مقادیر R ² و NS در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵۸ و در دوره اعتبارسنجی ۰/۵۲ و ۰/۵۱ بود. با توجه به اینکه مدل IHACRES رواناب را در مقیاس روزانه شبیه سازی می نماید، می توان کارایی مدل را قابل قبول ارزیابی نمود.	تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۵/۲۸] تاریخ بازنگری: [۱۴۰۲/۰۹/۱۰] تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۹/۱۹] واژه های کلیدی: آب های سطحی حوزه آبخیز کارایی مدل مدیریت منابع آب

* نویسنده مسئول:

a.toranjian@malayeru.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

اسکندری، سعید، و ترنجیان، امین. (۱۴۰۳). شبیه سازی بارش- رواناب حوضه ملایر با استفاده از مدل های IHACRES و SWAT. محیط زیست و مهندسی آب. 10(4) 510-524. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.412444.1886>



۱- مقدمه

درک و پیش‌بینی فرایندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوزه آبخیز یکی از اساسی‌ترین مباحث در علم هیدرولوژی محسوب می‌شود. فرآیند بارش-رواناب فرآیند پیچیده‌ای است که در آن عوامل زیادی مؤثر هستند. دانستن این فرآیند برای برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب در حوزه آبخیز ضروری است. با توجه به ناهمگنی و عدم یکنواختی در توپوگرافی، خاک، پوشش، کاربری اراضی و عوامل زمین‌شناسی و تغییر اقلیم در حوزه آبخیز و برآورد واقعی‌تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی نسبت به مدل‌های یکپارچه ارجحیت دارد. شناخت و پیش‌بینی تغییرات آب‌های سطحی در حوزه‌های آبخیز یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین فرایندهای هیدرولوژیکی می‌باشد (Zorratipour et al. 2021).

بارش مهم‌ترین و مؤثرترین منبع آب یک حوزه آبخیز می‌باشد که با توزیع غیریکنواخت مکانی و زمانی در سطح حوزه تغییر می‌کند. پیش‌بینی بارش و رواناب ناشی از آن، نه تنها در مدیریت بهره‌برداری صحیح از حوزه با اهمیت است بلکه در به حداقل رساندن خسارات ناشی از سیلاب و خشکسالی نیز نقش مؤثری ایفا می‌نماید. مدل‌های هیدرولوژیکی ابزارهای مفیدی برای تحلیل و پاسخ به مسائل مرتبط با کمیت و کیفیت منابع آب هستند. این مدل‌ها توانایی محاسبه جریان را در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی دارند (et al. 2022). Mokhtari). مدل‌های IHACRES¹ و SWAT² امروزه از مدل‌های پرکاربرد در پژوهش‌های مرتبط با حوزه آبخیز و مدیریت منابع آب شناخته می‌شوند. George and Sathian (2016) رواناب ناشی از بارش را در زیرحوضه کورومالی رودخانه کاراوانور هند شبیه‌سازی نمودند. کارایی مدل توسط ضرایب R^2 و NS مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقادیر برای دوره واسنجی ۰/۹۶ و ۰/۸۸ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۹ و ۰/۹ محاسبه شد. نتایج پژوهش نشان داد سهم رواناب سطحی ۹٪ و جریان آب زیرزمینی ۶۴٪ از بارش سالیانه است. (Getachew et al. 2017) مطالعاتی با هدف ارزیابی مدل‌های بارش رواناب IHACRES و SWAT در پایین‌دست رودخانه نیل انجام دادند. نتایج، برتری روش شبکه عصبی

Mengistu مصنوعی نسبت به دو مدل مذکور را نشان داد. (et al. 2019) در پژوهشی در حوضه ساتلپ کشور آفریقای جنوبی با مساحت 6770 km^2 و اقلیم خشک و نیمه‌خشک، مدل SWAT را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ارزیابی عملکرد مدل از مطلوبیت قابل‌قبولی برخوردار بود. Rivas- Tabares (2019) et al. در پژوهشی از مدل SWAT برای بررسی بیلان آب حوضه کگا-ارسما استفاده کردند. نتایج حاصل، نشان دهنده عملکرد بالای مدل در شبیه‌سازی با شرایط هیدرولوژیکی حوضه‌های بزرگ مقیاس به‌خصوص مناطقی با شرایط نیمه خشک سرد می‌باشد. نتایج مطالعات Yang et al. (2019) نشان داد مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوزه‌های آبخیز بدون آمار در نقاط مختلف جهان کارایی قابل‌قبولی دارد. نتایج این مطالعات، برتر بودن روش شباهت فیزیکی نسبت به روش‌های دیگر را نشان داد. Fatehi and Shahoei (2020) در پژوهشی با استفاده از مدل SWAT، شبیه‌سازی رواناب ماهانه در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری سننه در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در استان کردستان را بررسی نمودند. با توجه به ضرایب شبیه‌سازی به‌دست آمده در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، مشخص شد که مدل SWAT دارای نتایج مناسبی در شبیه‌سازی رواناب ناشی از بارش در این حوضه می‌باشد. Ahmadi et al. (2020) در پژوهشی با هدف برآورد رواناب در حوزه آبخیز گرگان‌رود منطقه آق‌قلا از مدل IHACRES استفاده کردند. این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی بارش رواناب منطقه مورد مطالعه داشت. البته مدل در شبیه‌سازی رواناب‌های بیشینه عملکرد قابل‌قبولی نشان نداده است که می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری اراضی، خشکی حوضه و همچنین نقش سد و شمشگیر به‌عنوان عامل کنترلی رواناب‌های بیشینه باشد. Diriba (2021) شبیه‌سازی رواناب سطحی رودخانه دابوس کشور اتیوپی را با استفاده از مدل SWAT انجام داد. ضرایب R^2 و NS در دوره واسنجی ۰/۸۲، ۰/۷۰ و در دوره اعتبارسنجی ۰/۷۸ و ۰/۷۱ محاسبه شدند که این نتایج بیان‌کننده کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه بود.

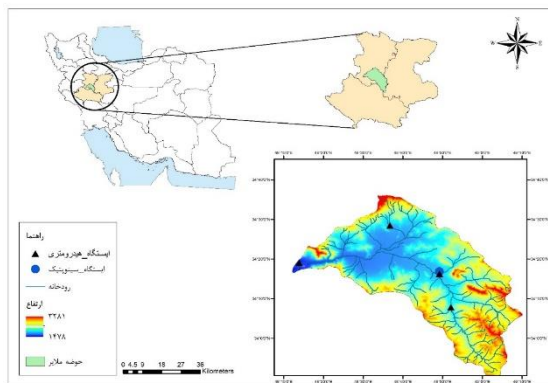
²Soil and Water Assessment Tool¹Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow

رواناب در مقیاس روزانه و ماهانه می‌تواند موجب بررسی دقت مدل مورد نظر در حوزه آبخیز و استفاده از آن‌ها به عنوان ابزاری مناسب در مدیریت سیلاب منطقه گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز ملایر با جهت جنوب‌شرقی- شمال‌غربی در جنوب‌شرقی ملایر، با مساحت 23959 km^2 در محدوده بین $48/53^\circ$ تا $49/04^\circ$ و در بین $33/02^\circ$ تا $33/52^\circ$ عرض شمالی قرار گرفته است. رودخانه اصلی حوضه مورد مطالعه از سرشاخه‌های حوضه گاماسیاب بوده و با پیوستن به سمیره و رودخانه بزرگ کرخه به خلیج فارس می‌ریزد (شکل ۱). ارتفاع متوسط منطقه $2178/4 \text{ m}$ از سطح دریا و از لحاظ زمین-شناسی در زون سنندج- سیرجان واقع شده است. از نظر طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه دارای اقلیم نیمه سرد و خشک و رژیم بارندگی مدیترانه‌ای در منطقه حاکم است. متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه ملایر $320/3 \text{ mm}$ و بیش‌ترین بارندگی فصلی در فصل بهار در حدود 36% کل بارش است. نزولات جوی از اواخر آبان تا اواخر اسفند به‌صورت برف و تعداد روزهای یخبندان ۸۷ روز در سال می‌باشد. متوسط دمای سالانه $11/7^\circ \text{C}$ و متوسط حداکثر مطلق دما در ماه مرداد $37/3^\circ \text{C}$ می‌باشد (Kalhor et al. 2018).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز ملایر

Fig. 1 Location of Malayer watershed

۲-۲- مدل SWAT

مدل SWAT یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی است (Tuppad et al. 2010; Lee et al. 2010). SWAT توسط Arnold et al. (1998) برای پیش‌بینی و برآورد اثر عملیات مدیریت زمینی بر تولیدات آب،

Mehri et al. (2023) ارزیابی کارایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی جریان و تعیین متغیرهای رواناب در آبخیز سد قشلاق را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت متغیرهای، شماره منحنی رواناب، ضریب مانینگ برای جریان سطحی در بالادست، حداقل و حداکثر ذوب برف در طول سال و کمینه عمق آب، بیشترین تأثیر را در کارایی شبیه‌سازی جریان داشتند. نتایج نشان داد که مقدار NS و R^2 برای دوره واسنجی به ترتیب $0/62$ و $0/65$ و برای دوره اعتبارسنجی $0/61$ و $0/68$ بوده و بیان‌کننده کارایی بالایی مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه سد قشلاق است. همچنین نتایج نشان داد که از مجموع بارش ورودی، مقدار 55% بارش صرف تبخیر و تعرق، 30% تبدیل به نفوذ عمقی و مقدار 15% به جریان سطحی تبدیل شده است.

Negash et al. (2024) کارایی مدل SWAT در تخمین دقیق رواناب و رسوب زیرحوضه جما در کشور اتیوپی را مورد بررسی قرار دادند. ضریب R^2 در دوره واسنجی $0/62$ و در دوره اعتبارسنجی $0/63$ محاسبه شد. یافته‌های مدل SWAT نشان داد که اراضی بایر نه تنها مستعدترین نوع کاربری اراضی در برابر فرسایش خاک است، بلکه دارای بالاترین بار رسوبی نسبت به اراضی کشاورزی و مراتع است. علاوه بر این حداکثر بازده رسوب در ارتفاعات 3685 ton/ha برآورد شد در حالی که میانگین رسوب سالانه ارتفاعات $78/1 \text{ ton/ha}$ پیش‌بینی شد. حوزه‌های آبخیز خصوصیات و ویژگی‌های آب و هوایی، جغرافیایی و فیزیکی متفاوتی را دارا می‌باشند. تأمین نیازهای مصارف آب هر منطقه با توجه به اقلیم و وضعیت منابع آب موجود نیز متفاوت است. در بیشتر حوزه‌های آبخیز نبود اطلاعات کافی و یا نواقص آماری، بررسی واکنش حوضه را نسبت به بارش و رواناب ایجاد شده تحت تأثیر قرار داده است. سد کلان ملایر و منابع آب سطحی یکی از مهمترین منابع تأمین‌کننده آب شرب و کشاورزی منطقه می‌باشد. با تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی ایجاد شده، رخداد سیلاب‌های شدید در سال‌های اخیر موجب خسارات متعددی به خصوص در پایین دست حوزه آبخیز شده است. هدف از این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز ملایر با استفاده از مدل‌های SWAT و IHACRES در دوره‌های ماهانه و روزانه می‌باشد تا بتوان دبی سیلابی را با توجه به داده‌های موجود پیش‌بینی نمود. استفاده همزمان از این دو مدل در شبیه‌سازی

ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم است. در مدل SWAT، شبیه‌سازی بر اساس چرخه هیدرولوژی و بر پایه رابطه بیلان آبی (رابطه ۱) انجام می‌شود.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

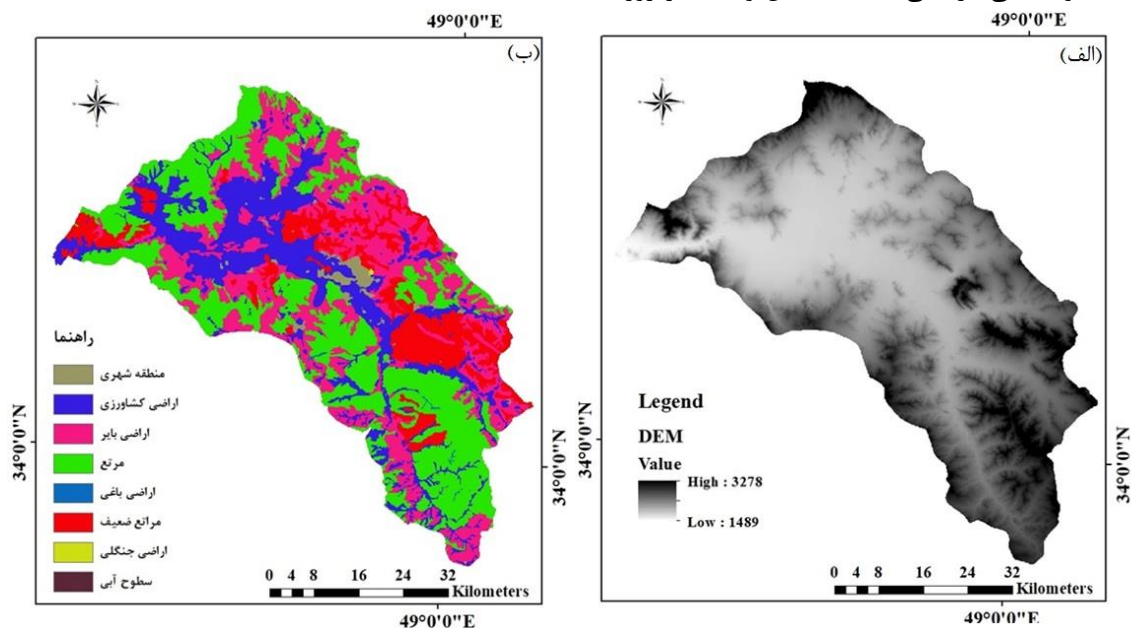
سرعت باد و رطوبت نسبی در دوره آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ از ایستگاه سینوپتیک ملایر و نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و اطلاعات مدل رقومی ارتفاع از سازمان‌های جهاد کشاورزی، منابع طبیعی و نقشه‌برداری دریافت شد. ابتدا بر اساس مدل رقومی ارتفاع (شکل ۲-الف) لایه شیب ایجاد، طبقه‌بندی و سپس شبکه آبراهه‌ها و حوزه آبخیز به ۱۷ زیرحوضه هیدرولوژیکی تقسیم شد. همچنین به‌منظور تلفیق لایه داده‌های واحدهای هیدرولوژیکی، نقشه خاک در چهار طبقه و نقشه کاربری اراضی در هشت طبقه تقسیم‌بندی شد (شکل ۲-ب). مراتع، اراضی بایر و اراضی کشاورزی به ترتیب با ۳۲، ۲۶ و ۲۰٪ بیش‌ترین طبقه کاربری را داشتند. اراضی شهری نیز که بیش‌ترین تأثیر را در تبدیل بارش به رواناب دارند، حدود ۲٪ منطقه را پوشش داده است.

رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در آبخیزهای گسترده و دوره‌های زمانی طولانی مدت، توسعه داده شد. SWAT مدلی هیدرولوژیکی نیمه توزیعی و پیوسته زمانی می‌باشد که تلاش شده بر اساس روابط فیزیکی تهیه و تنظیم شود. مدل SWAT

که در آن، SW_t : مقدار نهایی آب خاک (mm)، SW_0 : مقدار اولیه آب خاک (mm)، R_{day} : مقدار بارندگی در روز i ام (mm)، Q_{surf} : مقدار رواناب سطحی در روز i ام (mm)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (mm)، W_{seep} : مقدار آب نفوذیافته به لایه فوقانی خاک در روز i ام (mm)، Q_{gw} : مقدار جریان برگشتی در روز i ام (mm) می‌باشد (Golshan et al. 2015). مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی از داده‌های توپوگرافی، آب‌سنجی در خروجی حوضه، داده‌های بارندگی و درجه حرارت، باد، رطوبت نسبی روزانه، پوشش گیاهی و لایه رقومی ارتفاع زمین استفاده می‌نماید.

۲-۳- آماده‌سازی داده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی

برای اجرای مدل SWAT و شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز، داده‌های هواشناسی بارندگی، دمای حداقل و حداکثر روزانه،



شکل ۲- نقشه‌های: الف)- ارتفاعی و ب) کاربری اراضی حوزه آبخیز ملایر

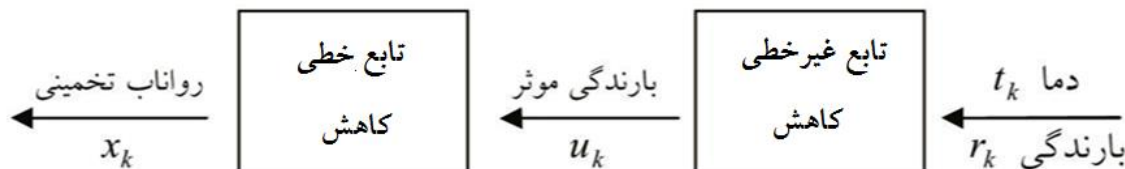
Fig. 2: a) Elevation and b) Land use maps of Malayer watershed

در نهایت با توجه به متغیرها و لایه‌های وارد شده، مدل بر اساس رابطه بیلان آبی (رابطه ۱) اجرا و مقدار رواناب سطحی به صورت ماهانه محاسبه شد.

پس از تهیه لایه تلفیقی حاصل از داده‌های سطحی منطقه مورد مطالعه، داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه، دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی و باد به مدل معرفی شدند.

۴-۲- مدل IHACRES

در مدل، آمار متغیرهای ورودی به صورت روزانه، ساعتی و یا دقیقه می‌باشد که در این پژوهش، آمار روزانه در نظر گرفته شد. به این منظور در ابتدا، بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط تابع تبدیل غیرخطی، به بارندگی مؤثر u_k تبدیل و سپس با استفاده از تابع تبدیل خطی به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- شبیه‌سازی بارش - رواناب با توابع خطی و غیرخطی در مدل IHACRES (Ahmadi et al. 2019)

Fig. 3 Precipitation-runoff simulation with linear and non-linear function of IHACRES model (Ahmadi et al. 2019)

۵-۲- آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

شرایط ایده‌آل در شبیه‌سازی زمانی است که R-factor نزدیک به صفر و P-factor به یک نزدیک باشد (Fatehi and Shahoei 2020).

با توجه به اینکه مدل بارش - رواناب IHACRES، مدلی متغیر محور با حداقل متغیرهای ممکن شامل داده‌های بارش، دما و رواناب می‌باشد، آنالیز حساسیت و واسنجی در برنامه نرم‌افزاری مدل طراحی شده و این فرایند به صورت خودکار بدون برنامه واسط اجرا می‌شود. به منظور تعیین عملکرد و بررسی کارایی دو مدل، داده‌ها از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ برای مرحله اعتبارسنجی تخصیص داده شد. در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی از معیارهای عملکرد شامل ضریب همبستگی (R^2) (رابطه ۲)، ضریب نش- ساتکلیف (NS^1) (رابطه ۳)، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE^2)$ (رابطه ۴) و اریبی (Bias) (رابطه ۵) استفاده شد.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})^2}{N}} \quad (4)$$

$$Bias = \frac{\sum_i (Q_{m,i} - Q_{s,i})}{N} \quad (5)$$

که، Q_s و Q_m به ترتیب جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و N تعداد کل داده‌ها می‌باشد. معیار R^2 نشان‌دهنده تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش

مدل SWAT فرایندهای هیدرولوژیک حوضه را تا حد امکان به صورت فیزیکی و واقعی شبیه‌سازی می‌کند. این مدل یک مدل پارامتریک نیست و از روش بهینه‌سازی به منظور تطبیق با مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده نمی‌کند. بنابراین با توجه به تعداد زیاد متغیرها در مدل SWAT، واسنجی مدل بدون در نظر گرفتن فرایند آنالیز حساسیت به زمان زیادی نیاز دارد. تأثیر هر کدام از متغیرهای دخیل در شبیه‌سازی با مقدار P-value و T-stat نشان داده می‌شود. هر متغیری که مقدار قدر مطلق T-stat بیش‌تری داشته باشد و همچنین P-value آن نزدیک به صفر باشد، دارای تأثیرگذاری بیشتری در شبیه‌سازی می‌باشد.

فرایند واسنجی مدل موجب تصحیح متغیرهای تأثیرگذار بر نتایج خروجی مدل است به طوری که نتایج خروجی تا حد امکان به مقادیر اندازه‌گیری شده منطبق و معیارهای ارزیابی عملکردی تعیین شده در محدوده متناسب باشد. با توجه به تکرار زیاد در فرایند واسنجی، برنامه واسط SWAT-CUP برای اجرای دقیق مراحل تکرار واسنجی تهیه شده است (Mehri et al. 2023). در این مطالعه از روش SUFI-2 در برنامه واسط SWAT-CUP استفاده شد. مزیت این روش این است که عدم قطعیت داده‌های ورودی در فرایند مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. این روش برای ارزیابی عدم قطعیت از دو معیار R-factor و P-factor بهره می‌گیرد به طوری که

²Root Mean Squared Error

¹Nash Sutcliffe

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

SWAT

برای تحلیل حساسیت و واسنجی مدل از روش SUFI-2 در برنامه واسطه SWAT-CUP استفاده شد. حساسیت متغیرهای ورودی مدل با استفاده از معیارهای P-value و T-stat تعیین شد. درجه تأثیر هر کدام از متغیرهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی رواناب در جدول (۱) نشان داده شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد، فاکتور ذوب برف، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و دمای بارش برف جزء مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده رواناب جریان در حوزه آبخیز مورد مطالعه است.

رگرسیون می‌باشد (Pyo et al. 2019; Ahmadi et al. 2019).

معیار NS، اختلاف نسبی رقوم مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را نشان داده و مقدار این فاکتور بین یک تا منفی بی‌نهایت متغیر است (Nash and Sutcliffe 1970). معیار NS تغییرات اعمال شده نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره زمانی مورد نظر را توضیح می‌دهد. اگر ضریب منفی شود، تخمین مدل بسیار بدتر از تخمینی است که با استفاده از میانگین کل مقادیر مشاهداتی بدست می‌آید. مقدار بیشتر از ۰/۵ ضریب NS بیان‌کننده شبیه‌سازی نسبتاً قابل قبول توسط مدل می‌باشد. با شاخص NS می‌تواند کارایی مدل را با تکرار داده‌های مشاهداتی مستقل تحلیل نمود در حالی که شاخص R^2 برای این نوع تحلیل مناسب نیست (Green et al. 2007).

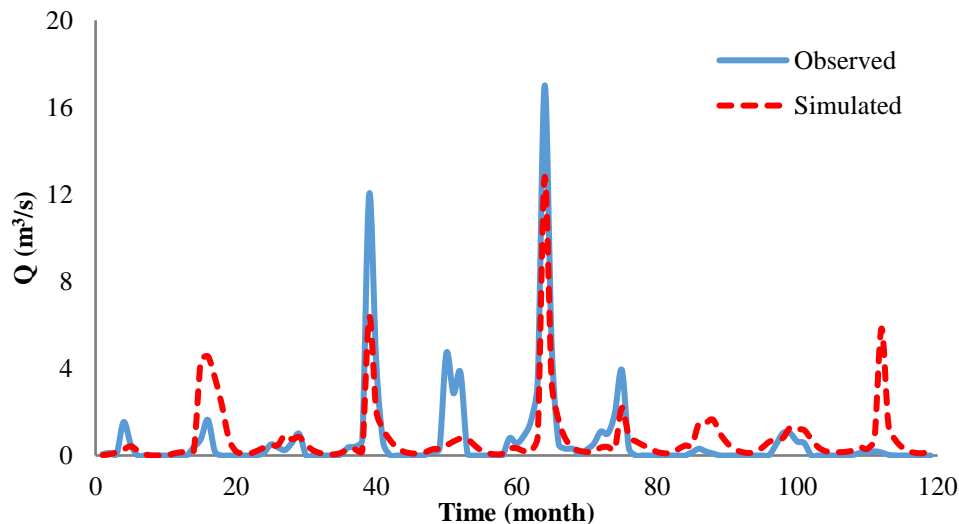
جدول ۲- متغیرهای حساس نهایی و دامنه تعدیل شده‌ی متغیر مؤثر بر رواناب

Table 2 The final sensitive parameters and the adjusted range of the parameters affecting runoff

Index	P-value	T-stat	Min	Max
December 21 snow melt factor	0	4.92	0.14	1.85
Hydraulic conductivity of soil saturation (mm/hr)	0	4.03	-0.19	0.52
Snowfall temperature (°C)	0.02	-2.29	3.34	5.14
Scaling factor to control the effect of storage time constant for normal flow	0.03	-2.2	5.7	7.56
Water threshold depth in shallow aquifer for return flow (mm)	0.14	-1.48	520.7	691.7
bulk density of soil (Mg/m ³)	0.17	-1.37	-0.26	-0.13
Average usable water (m)	0.18	1.33	0.79	1.11
Scaling factor to control the effect of storage time constant for low flow	0.19	-1.3	4.98	7.76
The height of water from the surface in groundwater (m)	0.2	-1.27	30.12	42.58
Snow melting base temperature (°C)	0.24	1.18	-1.35	0.45
Average slope length (m)	0.27	1.09	88.49	133.48
Threshold depth of water in a shallow aquifer to penetrate a deep aquifer (mm)	0.42	-0.81	111.2	144.0
Curve number	0.5	0.67	-1.18	-0.91
Snow melting factor on June 21	0.57	0.56	-1.04	1.82
Water depth in a deep aquifer (mm)	0.64	0.47	1964	3200
Surface runoff delay coefficient	0.65	-0.46	14.15	19.45
Initial water depth in open aquifer (mm)	0.66	-0.44	-3021	-1447
Manning roughness coefficient for flow over land surface (s/m ^{1/3})	0.68	-0.41	1.02	1.2
Evaporation compensation factor from soil	0.69	-0.4	0.11	0.45
Wet soil reflection coefficient	0.74	-0.33	0.06	0.23

تطابق مناسب مشاهده شد به طوری که در برخی رخدادها کم برآورد یا بیش برآورد مشاهده می‌شود (شکل ۴). پس از اینکه متغیرها تعدیل و مدل واسنجی شد، اعتبارسنجی مدل برای دوره زمانی مستقل از دوره واسنجی انجام شد. در این پژوهش یک سوم کل داده‌های رواناب از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ ایستگاه هیدرومتری برای مرحله اعتبارسنجی انتخاب شد. R^2 به دست آمده در مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۰ و شاخص NS نیز ۰/۶۳ محاسبه شد (جدول ۲).

پس از تعیین متغیرهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی رواناب منطقه، واسنجی مدل در دوره آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲ انجام شد. ارزیابی نتایج حاصل از واسنجی برای معیارهای R^2 ، NS، R-factor و P-factor به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۵، ۰/۲۸ و ۰/۲۴ برآورد شد که این نتایج نشان دهنده شبیه‌سازی مناسب مدل در این مرحله می‌باشد (جدول ۲). نتایج حاکی از رضایت‌بخش بودن نسبی شبیه‌سازی مدل در طول دوره واسنجی است. در جریانات پایه‌ای تطابق مناسب و در چند رخداد بارش عدم



شکل ۴- جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی

Fig. 4 Observed and simulated flow for the calibration period

دوره ۷ ساله واسنجی و دوره ۳ ساله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۵ محاسبه شد. نتایج پژوهش نشان دهنده کارایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب است. (شکل ۵) هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، در دوره اعتبارسنجی هر دو نمودار تطابق مناسبی داشته و مدل، شبیه‌سازی مناسبی در زمان حداکثر دبی سیلاب انجام داده است. (Van Griensven et al. (2012 مقدار رواناب حوضه‌های مربوط به رودخانه نیل را با استفاده از مدل SWAT برآورد کردند. مقدار ضریب NS از ۰/۱۳۷ تا ۰/۸۷، مقدار ضریب R^2 بین ۰/۲۶ تا ۰/۷۲ و مقدار VFI از ۰/۹۸ تا ۰/۴۳ محاسبه شدند. نتایج معیارهای ارزیابی بیانگر این است که مدل SWAT به طور مطلوبی جریان رودخانه را در شرایط محدود دسترسی به داده‌ها شبیه‌سازی کرده است. نتایج این پژوهش در دامنه معیارهای ارزیابی مطالعات ذکر شده تطابق دارد. علیرغم مناسب بودن معیارهای ارزیابی مدل،

جدول ۲- معیارهای ارزیابی مدل SWAT در مرحله

واسنجی و اعتبارسنجی

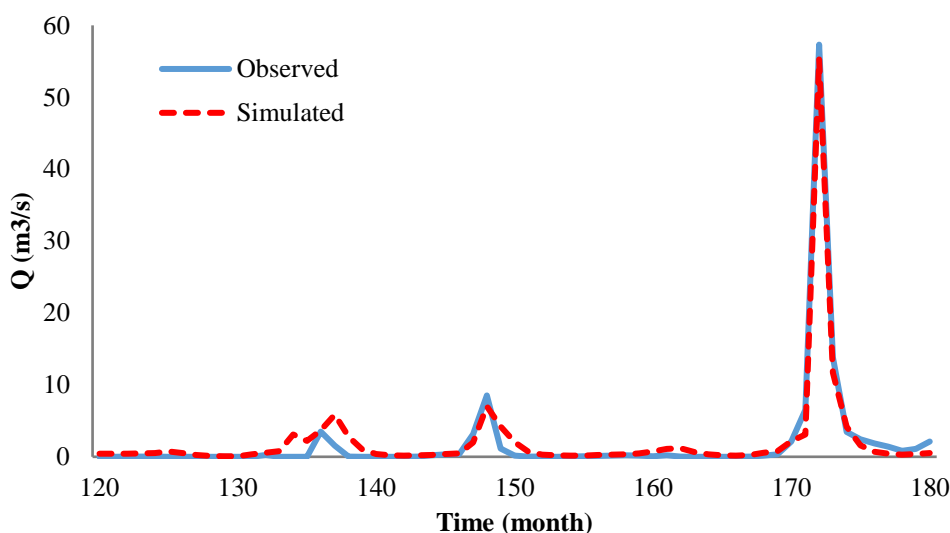
Table 2 Evaluation criteria of SWAT model for the Calibration and validation period

Period	NS	R^2	P-factor	R-factor
Calibration	0.68	0.65	0.24	0.28
Validation	0.63	0.70	0.39	1.03

(Santhi et al. (2001 از معیار $R^2 > 0.6$ و $NS > 0.5$ برای ارزیابی شبیه‌سازی مدل SWAT استفاده نمودند. در این پژوهش معیارهای $NS > 0.5$ و $R^2 > 0.5$ به عنوان استاندارد جهت تأیید شبیه‌سازی استفاده شد. بر اساس پیشنهاد Benaman and Shoemaker (2005) زمانی که مقدار R^2 بیش‌تر از ۰/۶ و شاخص NS نیز بیش‌تر از ۰/۵ باشد می‌توان مدل را رضایت‌بخش در نظر گرفت. (Naseri et al. (2018 جریان رواناب حوزه آبخیز سد فریمان را با کمک گرفتن از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی نمودند. نتایج بدست آمده، در ارزیابی مدل، ضریب NS رواناب ماهانه برای

مطرح شده می‌توان توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوزه آبخیز ملایر تأیید کرد. دقت و آماده‌سازی مناسب داده‌ها در مرحله ورود و واسنجی مدل می‌تواند شرایط واقعی‌تری از حوضه را در شبیه‌سازی ایجاد نماید.

در برخی از دوره‌های زمانی، مقدار دبی پایه یا نقاط اوج هیدروگراف، کم‌تر یا بیش‌تر از مقدار مشاهده شده برآورد شد. دخالت‌های انسانی در چرخه هیدرولوژی و پیچیدگی مدل‌سازی این چرخه موجب ایجاد عدم تطابق بین جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشد. با توجه به همه موارد



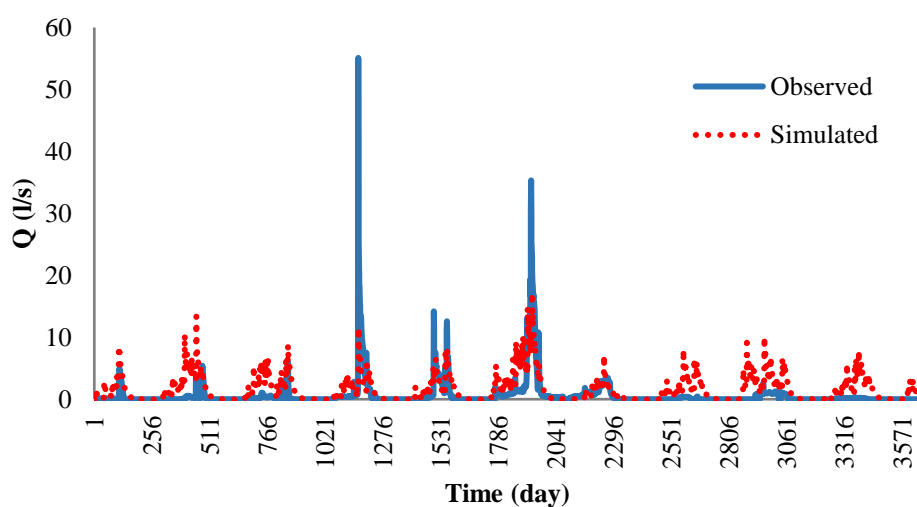
شکل ۵- جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی

Fig. 5 Observed and simulated flow for the validation period

نشده است. داده‌های دوره زمانی ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۲ برای واسنجی و دوره ۱۳۹۳-۱۳۹۸ برای اعتبارسنجی منظور شد. نتایج ارزیابی مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب روزانه بر اساس معیارهای R^2 ، Bias، NS و RMSE در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۵۸، ۰/۶۶، ۰/۸۲ و ۲/۳۷ محاسبه شد (جدول ۳).

۳-۲- واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES

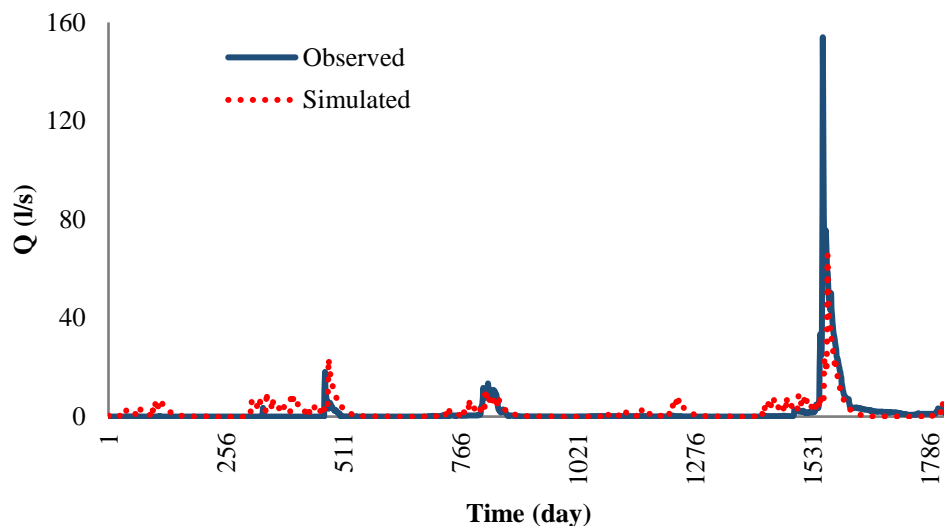
در این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب روزانه با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES انجام شد. با توجه به اینکه این مدل از سه متغیر دما، بارش و رواناب برای شبیه‌سازی بهره می‌برد، آنالیز حساسیت در فرایند واسنجی مدل در نظر گرفته



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب در دوره واسنجی

Fig. 6 Observed and simulated flow for the calibration period

نتایج ارزیابی مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب روزانه بر اساس معیارهای NS، R^2 ، Bias و RMSE در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۵۲، ۰/۲۶ و ۶/۴۷ برآورد شد (جدول ۳). نمودار هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره اعتبارسنجی نشان دهنده تطابق مناسب مدل در جریان پایه و دبی‌های اوج کوتاه می‌باشد اما این تطابق در تک رخداد اوج رواناب مشاهده نمی‌شود. شکل (۷) که نتایج شبیه‌سازی پس از دوره واسنجی است نشان از تطابق مناسب مدل نسبت به دوره قبل از واسنجی (شکل ۶) دارد. ضعف عملکرد مدل در برخی رخدادهای مربوط به عدم همبستگی بین داده‌های بارش و رواناب است که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی و رژیم برفی حوزه آبخیز باشد.



شکل ۷- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب در دوره اعتبارسنجی
Fig. 7 Observed and simulated flow for the validation period

فاکتور مذکور بیش از ۰/۷۵ باشد نتایج مدل خوب است (Motovilov et al. 1999). علیرغم ضعف مدل IHACRES در شبیه‌سازی برخی رخدادهای اوج رواناب، توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان روزانه را می‌توان نسبتاً قابل قبول دانست.

۴- نتیجه‌گیری

۱- تحلیل حساسیت مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز ملایر نشان داد، فاکتور ذوب برف، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و دمای بارش برف، مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده جریان رواناب هستند.

نمودار هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی نشان دهنده تطابق نسبی مناسب مدل در جریان پایه و دبی‌های اوج کوتاه در برخی رخدادهای بارش است. توانایی مدل برای شبیه‌سازی رخدادهای سیلاب حداکثر در دوره واسنجی مورد تأیید قرار نگرفت (شکل ۶).

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل IHACRES در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

Table 3 Evaluation criteria of IHACRES model for the Calibration and validation period

Period	RMSE	Bias	NS	R^2
Calibration	2.37	-0.82	0.58	0.66
Validation	6.47	-0.26	0.51	0.52

Sadeghi et al. (2015) کارایی مدل IHACRES را در شبیه‌سازی روزانه رواناب حوضه ناورود با کمک از معیارهای ارزیابی NS و Bias مورد ارزیابی و بررسی قرار دادند. در این پژوهش معیارهای NS و Bias در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۵۷ و ۸/۵۳ و در دوره اعتبارسنجی ۰/۴۸ و ۱۴/۹ برآورد شد. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان حوضه مورد مطالعه بود. Abushandi and Merkel (2013) برای شبیه‌سازی رویداد جریان ساعتی در حوضه خشک Dhuliel از مدل IHACRES و HEC-HMS استفاده نمودند که معیار NS به ترتیب برای دو مدل ۰/۵۱ و ۰/۸۸ محاسبه شد. هرگاه مقادیر فاکتور NS بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد نتایج مدل رضایت‌بخش و در صورتیکه مقادیر

سیاسگزاری

داده‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان همدان و داده‌های هواشناسی از سازمان هواشناسی استان همدان دریافت شده است که از همکاری این ادارات تقدیر و تشکر می‌گردد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان همدان دریافت شده است و برخی داده‌های استفاده شده یا تولید شده در این پژوهش در نمودار یا جداول مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A., & Deyrmajai, A. (2020). Runoff Estimation Using IHACRES Model Based on CHIRPS Satellite Data and CMIP5 Models (Case Study: Gorganroud Basin- Aq Qala Area). *Iran. J. Soil Water Res.*, 51(3), 659-671. [In Persian] DOI: [10.22059/ijswr.2019.289144.668316](https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.289144.668316).
- Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyani, G. R. (2019). Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Phys. Chem. Earth*, 111, 65-77 DOI: [10.1016/j.pce.2019.05.002](https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002)
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S., Muttiah, and J. R. Williams. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Res. Assoc.* 34(1), 73-89 DOI: [10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x)
- Abushandi, E., & Merkel, B. (2013). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resour. Manag.*, 27, 2391-2409 DOI: [10.1007/s11269-013-0293-4](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0293-4)
- Benaman, J. and Shoemaker, C.A. (2005). An analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance, *Hydrolog.*
- Process., 19(3), 605-620 DOI: [10.1002/hyp.5608](https://doi.org/10.1002/hyp.5608)
- Diriba, B.T. (2021). Surface runoff modeling using SWAT analysis in Dabus watershed, Ethiopia. *J. Sustain. Water. Res. Manage.*, 7(96), 1-11. DOI: [10.1007/s40899-021-00573-1](https://doi.org/10.1007/s40899-021-00573-1)
- Fatehi, Z., & Shahoei, S. V. (2020). Application of SWAT Model for Simulating Monthly Runoff, Lake Urmia Watershed in Kurdistan Province, Iran. *Environ. Water Eng.*, 6(3), 294-304. [In Persian] DOI: [10.22034/jewe.2020.218842.1346](https://doi.org/10.22034/jewe.2020.218842.1346)
- George, S. and Sathian, K. (2016). Assessment of water balance of a watershed using SWAT model for water resources management, *Int. J. Eng. Res. Sci. Technol.*, 5, 177-184 DOI: [10.5281/zenodo.48859](https://doi.org/10.5281/zenodo.48859)
- Getachew Tegegne, G., Park, D. K., & Kim, Y. O. (2017). Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 14, 49-66 DOI: [10.1016/j.ejrh.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.002)
- Green, C. H., Arnold, J. G., Williams, J. R., Haney, R., & Harmel, R. D. (2007). Soil and water assessment tool hydrologic and water quality evaluation of poultry litter application to small-scale subwatersheds in Texas. *Trans. ASABE*, 50(4), 1199-1209 DOI: [10.13031/2013.23634](https://doi.org/10.13031/2013.23634)

- Golshan, M., Kavian, A., Ruohani, H., & Esmali Ouri, A. (2015). Effect of Scale on SWAT Model Performance in Simulation of Runoff (Case Study: Haraz Catchment in Mazandaran Province). *Iran. J. Soil Water Res.*, 46(2), 293-303. [In Persian] DOI: [10.22059/ijswr.2015.55934](https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.55934)
- Kalhor, E., Nouri, H., & Ildoromi, A. (2018). Climate Change Effects on Soil Freezing Depth in a Mountainous Region and a Semi-Arid Climate on the Malayer Plain. *J. Watershed Manag. Res.*, 31(3), 40-55 [In Persian] DOI: [10.22092/wmej.2018.121655.1113](https://doi.org/10.22092/wmej.2018.121655.1113)
- Lin, Z., & Radcliffe, D. E. (2006). Automatic calibration and predictive uncertainty analysis of a semidistributed watershed model. *Vadose Zone J.* 5(1), 248-260 DOI: [10.2136/vzj2005.0025](https://doi.org/10.2136/vzj2005.0025)
- Lee, M., Park, G., Park, M., Park, J., Lee, J., & Kim, S. (2010). Evaluation of non-point source pollution reduction by applying Best Management Practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery. *J. Environ. Sci.*, 22(6), 826-833. DOI: [10.1016/S1001-0742\(09\)60184-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60184-4)
- Littlewood, I. G., Clarke, R. T., Collischonn, W., & Croke, B. F. (2007). Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian watersheds. *Environ. Model Software*, 22(9), 1229-1239. DOI: [10.1016/j.envsoft.2006.07.004](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.07.004)
- Mehri, S., Moradi, H. R., & Mostafazadeh, R. (2023). Simulation and determination of hydrological balance components in the upstream of Gheshlagh Dam Using SWAT model. *Environ. Water Eng.*, 9(4), 485-498. [In Persian] DOI: [10.22034/ewe.2023.360340.1805](https://doi.org/10.22034/ewe.2023.360340.1805)
- Mengistu, A. G., van Rensburg, L. D., & Woyessa, Y. E. (2019). Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid watersheds in South Africa. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 25, 100621 DOI: [10.1016/j.ejrh.2019.100621](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621)
- Mokhtari, F., Honarbakhsh, A., Soltani, S., Abdolahi, K., & Pajohesh, M. (2022). Evaluating Hydrological SWAT Model in Runoff Simulation of Karkheh Watershed. *DEEJ.*, 9(27), 47-58. [In Persian] DOI: [10.22052/DEEJ.2020.9.27.25](https://doi.org/10.22052/DEEJ.2020.9.27.25)
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., & Rodhe, A. (1999). Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agr. Forest Meteorol.*, 98, 257-277 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1)
- Naseri, F., azari, M., & Dastoorani, M. T. (2018). Simulation of Stream Flow and Sediment Yield in Fariman Dam Watershed Using SWAT Model and Genetic Algorithm. *Water Soil*, 32(3), 447-462. [In Persian] DOI: [10.22067/jsw.v32i3.68900](https://doi.org/10.22067/jsw.v32i3.68900)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10(3), 282-290. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Negash, T. Z., Mekuria, A. D., Solomon, A. T., & Yitea, S. G. (2024). Predicting runoff and sediment yields using soil and water assessment tool (SWAT) model in the Jemma Subbasin of Upper Blue Nile, Central Ethiopia. *Environ. Challenges*, 14, 100806. DOI: [10.1016/j.envc.2023.100806](https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100806)
- Pyo, J., Pachepsky, Y. A., Kim, M., Baek, S. S., Lee, H., Cha, Y., & Cho, K. H. (2019). Simulating seasonal variability of phytoplankton in stream water using the modified SWAT model. *Environ. Model Software*, 122, 104073. DOI: [10.1016/j.envsoft.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.005)
- Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., Willaarts, B., & De Miguel, A. (2019). An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. *Agric. Water Manag.*, 212, 211-225. DOI: [10.1016/j.agwat.2018.09.012](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.012)
- Sadeghi S H, Ghasemieh H, Sadatinegad S J. (2015). Performance evaluation of the IHACRES hydrological model in wet areas (Case study: Navrud Basin, Gillan). *Agric. Water Manag.*, 19(73), 73-83. [In Persian] DOI: [10.18869/acadpub.jstnar.19.73.73](https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.73)

- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37(5), 1169-1188. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x)
- Tuppad, P., Kannan, N., Srinivasan, R., Rossi, C. G., & Arnold, J. G. (2010). Simulation of agricultural management alternatives for watershed protection. *Water Resour. Manag.*, 24, 3115-3144 DOI: [10.1007/s11269-010-9598-8](https://doi.org/10.1007/s11269-010-9598-8)
- Van Griensven, A., Ndomba, P., Yalew, S., & Kilonzo, F. (2012). Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(9), 3371-3381. DOI: [10.5194/hessd-9-3761-2012](https://doi.org/10.5194/hessd-9-3761-2012)
- Yang, X., Magnusson, J & Xu, C.-Y. (2019). Transferability of regionalization methods under changing climate. *J. Hydrol.*, 568, 67-81. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.10.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.030)
- Zorratipour, M., Zarei, H., Sharifi, M., & Radmanesh, F. (2021). Hydrological simulation of Bakhtegan basin in Iran using the SWAT model. *Irriga. Sci. Eng.*, 44(2). [In Persian] DOI: [10.22055/jise.2021.36821.1964](https://doi.org/10.22055/jise.2021.36821.1964)