Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering (JISE)**
**Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 89-104**

**Research Paper**

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

**EXTENDED ABSTRACT**

# Identifying Key Factors Influencing Runoff and Simulating Rainfall-Runoff with the SWAT Hydrological Model: A Case Study of the Khersan Watershed

K. Shahedi[1*], S.H. Roshun[2], A. Shahnazari[3] and M. Ghorbanifard[4]

*1*- Corresponding Author, Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (k.shahedi@sanru.ac.ir)*
*2- Researcher, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*
*3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*
*4- M.Sc., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Artlcle history:*
Received: 22 January 2025
Revised: 10 August 2025
Accepted: 28 August 2025
Available online: 05 August 2026

*Keywords:*
Sensitivity Analysis, Flood Forecasting, Water Resources Management, ArcSWAT, Khersan Watershed.

**TO CITE THIS ARTICLE:**

Shahedi, K., Roshun, S. H., Shahnazari, ,. A., Ghorbanifard, ,. M. 2026. 'Identifying Key Factors Influencing Runoff and Simulating Rainfall-Runoff with the SWAT Hydrological Model: A Case Study of the Khersan Watershed', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 89-104. doi: 10.22055/jise.2025.48844.2154.

**Abstract**

Rainfall-runoff modeling is a tool for flood prediction, and risk minimization. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to determine the factors affecting runoff. For this purpose, spatial data including Digital Elevation Model (DEM), land use, and soil were obtained from reliable sources and finalized in ArcGIS software. Then, climatic data including precipitation, maximum and minimum temperature, relative humidity, wind speed, evapotranspiration, and solar radiation were obtained from various meteorological stations. The model calibrated using the SUFI2 algorithm and then the model validation and sensitivity analysis were carried out. The model performance was evaluated using statistical evaluation criteria including RMSE, R2 and NSE. The results of the model sensitivity analysis showed that the model is sensitive to 16 of the 23 parameters. Also, the model simulation during the calibration and validation period with RMSE values of 18.01 and 53.93 and R2 values of 0.85 and 0.91 and NSE coefficients of 0.72 and 0.36 indicate the model performance in the rainfall-runoff simulation in the studied basin. Given the arid and semi-arid climate of Iran and the limited water resources, there is a need to identify the most important components in the process of converting precipitation into runoff. Therefore, the SWAT model can be considered a useful tool in determining these components and can be used in rainfall-runoff simulation for water resources planning and management.

## Introduction

Precipitation is one of the most complex elements of the hydrological cycle, exhibiting significant variations in both time and space. Forecasting precipitation is not an easy task, and it involves many uncertainties (Zand and Samaei, 2017). Estimating the runoff resulting from atmospheric precipitation forms the foundation for various studies related to the development and management of water resources. This estimation is crucial for a better understanding of

hydrological issues, water resource management, river engineering, flood control structures, and flood storage. Therefore, the estimation of surface runoff in river basins is an important and complex issue that requires investigation and modeling of river regime (Xue et al., 2022). One of the most significant applications of surface flow estimation in watershed management is flood management, along with the design of hydraulic structures and reservoir policies (Mahmoudi et al., 2021). Watershed hydrology simulation models are employed to better understand the hydrological processes that control the movement of surface and subsurface water. One of the most widely used hydrological models is the semi-distributed SWAT model. The SWAT model is a large-scale model designed to simulate the impact of various land management methods on water, sediment, and chemical agricultural substances at the basin level, taking into account different soil types and land uses over the long term, based on water balance. Among the spatial information required by the SWAT model is the digital elevation model (DEM), which plays a crucial role in extracting the hydrographic characteristics of the basin and estimating the spatial distribution of runoff and sediment load (Goodarzi et al., 2016). The ability of watershed models to accurately simulate hydrological processes is evaluated through parameter sensitivity analysis, model calibration, and model validation.

**Methodology**

The Khersan watershed is one of the important sub-watersheds of the Karun watershed, located in the southwest of Iran, spanning the provinces of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, Chaharmahal and Bakhtiari, and Isfahan. The SWAT hydrological model was utilized to identify the effective components influencing runoff and to simulate rainfall-runoff in this watershed. For this purpose, spatial data was gathered, including a digital elevation model (DEM) with a 30-meter resolution from SRTM satellite data, a slope layer derived from the DEM, a land use map created by classifying Landsat 8 satellite images using the Supervised Maximum Likelihood Classification (MLC) method, and a soil layer based on the soil map from the Food and Agriculture Organization (FAO). Meteorological data, including daily rainfall, minimum and maximum temperatures, wind speed, and relative humidity, were collected from 14 meteorological stations in the basin covering the period from 07/01/1997 to 06/30/2020. River flow data were obtained from three hydrometric stations located in different areas of the basin. To implement the SWAT model, the ArcSWAT extension within the ArcGIS 10.8 software environment was used. The digital elevation model of the area was added to the software, allowing the model to calculate the watershed area, sub-watershed, main stream network, and other physical characteristics of the watershed. In the next step, using the land use and soil maps, along with introduced classes of slope values, hydrological response units (HRUs) were defined by the model. After preparing the HRUs map, meteorological data including rainfall, minimum and maximum temperatures, average wind speed, and relative humidity were input into the model, and the modeling process was conducted.

**Findings**

The SWAT model was implemented using the Digital Elevation Model (DEM) layer, land use map, soil map, and meteorological data, including rainfall, maximum and minimum temperatures, relative humidity, and wind speed. Next, the SUFI-2 algorithm was employed to calibrate and validate the model results. A sensitivity analysis of the model was conducted using 29 default parameters, which revealed that 16 parameters were more sensitive. The remaining parameters had no significant effect on the basin runoff simulation, classifying them as insensitive parameters, which were then removed from the calibration process. The performance of the SWAT model in daily and monthly rainfall-runoff simulation, as measured by the Nash-Sutcliffe coefficient, was 0.724, 0.765, 0.87, and 0.88, respectively, for the calibration and validation periods. These results indicate the model's good performance in simulation and its suitability for estimating runoff in the region.

**Conclusion**

To simulate rainfall-runoff and determine the important components in the simulation, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was employed. The SWAT model was automatically

calibrated using the SUFI-2 algorithm for the period 1997-2020, with calibration conducted for the periods 1997-2013 and 2014-2020. The simulation results indicate that out of 23 important parameters used in the calibration for this basin, 16 effective parameters include: CN2 (initial SCS curve number for medium humidity conditions), ALPHA_BF (groundwater discharge constant), GW_DELAY (water transfer delay time from the last layer to groundwater), SOL_BD (soil bulk density), SOL_AWC (soil available water capacity), SOL_K (soil saturated hydraulic conductivity), SOL_ALB (reflectance coefficient or albedo of moist soil), REVAPMN (groundwater evaporation rate), SMTMP (snowmelt temperature), SMFMX (maximum annual snowmelt rate), ALPHA_BN (channel discharge constant), CANMX (maximum canopy retention), HRU_SLP (mean slope), and SOL_Z (thickness of soil layers). The evaluation of model performance using RMSE, $R^2$, and NSE criteria shows that during the calibration and validation periods, the RMSE values were 18.01 and 53.93, respectively. The $R^2$ coefficient values were 0.85 and 0.91 for the calibration and validation periods, respectively, while the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) values were 0.72 and 0.36, respectively. Overall, considering these three performance evaluation criteria, the SWAT model demonstrates good performance in the study area.

**Conflict of Interest**

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

## Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number Code: 04-1400-01.

## Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

**Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

**Authors' contribution**

**First Author:** Kaka Shahedi, Guidance, consulting, results control, editing
**Second Author:** Hossein Roshun, Initial writing, performing software/statistical analyses
**Third Author:** Ali Shahnazari, Consulting
**Fourth Author:** Mehdi Ghorbanifard, Data collection

**Acknowledgment**

The authors gratefully acknowledge the collaboration and financial support provided by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in conducting this research.

**References**

1- Goodarzi, M., Zahabiyoun, B., & Massah Bavani, A. 2016. Simulation of Rainfall-Runoff for Gharesou Watershed Using SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Technology, 18*(2), pp. 12-20. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9797.html (In Persian).

2- Mahmoudi, P., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. 2021. Surface Runoff Simulation Based on SWATCUP Sensitivity Analysis Method (Case study: Ghareh-Chay River). *Nivar, 45*(112-113), pp. 46-58. https://doi.org/10.30467/nivar.2021.261833.1173 (In Persian).

3- Xue, H., Liu, J., Dong, G., Zhang, C., & Jia, D. 2022. Runoff Estimation in the Upper Reaches of the Heihe River Using an LSTM Model with Remote Sensing Data. *Remote Sensing, 14*(10), pp. 2488. https://doi.org/10.3390/rs14102488.

4- Zand, M., & Samaei, R. 2017. Investigation on Amount and Intensity of Rainfalls in Flood Generation in Khorramabad Basin. *Nivar, 41*(96-97), pp. 1-8. https://doi.org/10.30467/nivar.2017.44813 (In Persian).

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٩، شماره‌ی۲، تابستان ١٤٠٥، مقاله پژوهشی، ص. ١٠٤-٨٩

# تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب و شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خرسان)

کاکا شاهدی[۱*]، سیدحسین روشان[۲]، علی شاهنظری[۳] و مهدی قربانی‌فرد[۴]

۱*- نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
k.shahedi@sanru.ac.ir

۲- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۴ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

## چکیده

**مدل‌سازی بارش-رواناب ابزاری برای پیش‌بینی سیل و اجتناب از تهدیدات و به حداقل رساندن خطرات است. در این مطالعه از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) برای تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب استفاده شده است. به این منظور ابتدا داده‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، کاربری اراضی و خاک‌شناسی از منابع معتبر اخذ و در نرم‌افزار ArcGIS نهایی گردید، سپس داده‌های اقلیمی شامل بارندگی، بیشینه و کمینه دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تبخیر و تعرق و تابش خورشیدی از ایستگاه‌های مختلف هواشناسی تهیه گردید. به‌منظور اجرای مدل از افزونه ArcSWAT و مدل SWAT استفاده گردید. فرآیند واسنجی مدل نیز با استفاده از الگوریتم SUFI2 انجام و سپس اقدام به اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت مدل شد. ارزیابی عملکرد مدل نیز با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری از جمله RMSE، $R^2$ و NSE انجام گردید. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که مدل از مجموع ۲۳ پارامتر به ١٦ پارامتر آن حساس است. همچنین شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی با مقادیر RMSE برابر با ۱۸/۰۱ و ۵۳/۹۳ و مقدار $R^2$ برابر با ۰/۸۵ و ۰/۹۱ و ضریب NSE برابر با ۰/۷۲ و ۰/۳٦ بیان از عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه مورد مطالعه دارد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور ایران و محدودیت منابع آب، نیاز به شناسایی مهمترین مؤلفه‌ها بر فرآیند تبدیل بارش به رواناب است. بنابراین می‌توان مدل SWAT را ابزاری مفید در تعیین این مؤلفه‌ها دانست و جهت برنامه‌ریزی منابع آبی و مدیریت آنها از آن در شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده کرد.**

**کلید واژه‌ها:** آنالیز حساسیت، پیش‌بینی سیل، مدیریت منابع آب، ArcSWAT، حوضه آبخیز خرسان.

### مقدمه

آب سطحی که نتیجه پاسخ‌های بارش-رواناب در یک حوضه می‌باشد، منبع بالقوه‌ای است که اگر به‌طور صحیح مدیریت شود، می‌تواند برای تأمین تقاضا، مفید واقع گردد (Kumar et al., 2021). بارش یکی از پیچیده‌ترین عناصر چرخه هیدرولوژی همراه با تغییرات زیاد در زمان و مکان است. پیش‌بینی بارش کار ساده‌ای نیست و عدم قطعیت‌های زیادی در آن وجود دارد (Zand and Samaei, 2017). برآورد رواناب ناشی از بارش‌های جوی، به‌عنوان پایه و اساس بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با توسعه و بهره‌برداری از منابع آبی شناخته می‌شود. این موضوع در درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، طراحی و مهندسی رودخانه، ساخت سازه‌های کنترل سیلاب و برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازی آب اهمیت بالایی دارد. از این‌رو، برآورد رواناب سطحی در حوضه‌های آبخیز رودخانه‌ها به‌عنوان یک چالش پیچیده و مهم مطرح است که نیازمند ارزیابی دقیق و مدل‌سازی رفتار رودخانه می‌باشد (Xue et al., 2022). برای این منظور مدل‌های بسیاری برای شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه آبخیز وجود دارد (Yaghoubi and Bahremand, 2011). شبیه‌سازی بارش-رواناب یکی از مهم‌ترین مباحث در هیدرولوژی و مدیریت محیط زیست محسوب می‌شود (Achite et al., 2022). با توجه به افزایش سریع نیاز به منابع آبی، ضرورت مدیریت یکپارچه و پایدار آب و داشتن درک دقیق‌تری از بیلان آبی به شدت احساس می‌شود (Anwar, 2010). برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه‌های آبخیز، به‌کارگیری مدل‌های متنوع که هر کدام برای شرایط خاصی طراحی شده‌اند، لازم است (Rezaei Moghaddam et al., 2021). به‌دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط دشوار فیزیکی و تغییرات اقلیمی، امکان درک و جمع‌آوری اطلاعات کافی درباره رواناب و رسوب در مناطق طبیعی وجود ندارد (Moradi et al.,

*DOI:* 10.22055/jise.2025.48844.2154

2019). مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی به بهبود فهم فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی کیفیت آب یاری می‌رسانند. انتخاب مدل مناسب بر اساس عواملی مانند دقت، قابلیت شبیه‌سازی و دسترسی به داده‌ها انجام می‌شود (Singh, 1995). این مدل‌ها باید به درستی منعکس کننده تغییرات در کاربری اراضی، مدیریت کشاورزی و اثرات آن‌ها بر جریان باشند. Arnold et al. (1998) شش ویژگی مهم یک مدل هیدرولوژیکی را ذکر کرده‌اند که عبارت است از: راندمان محاسباتی، جزئیات مکانی با کیفیت بالا، ورودی با دسترسی آسان، پیوستگی زمانی، توانایی شبیه‌سازی سناریوهای مدیریت زمین و توانایی ارائه نتایج مناسب. اجرای این مدل‌ها غالباً به سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و پایگاه داده‌های متعدد نیاز دارد تا بتوانند پارامترهای ورودی مدل را توسعه داده و نتایج شبیه‌سازی را تحلیل و نمایش دهند (He, 2003). یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی مدل نیمه‌توزیعی SWAT است. مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (Soil and Water Assessment Tool) مدلی بزرگ مقیاس است که برای شبیه‌سازی تاثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه‌های با خاک و کاربری اراضی مختلف در دراز مدت طراحی شده است که بر اساس بیلان آبی استوار است. فرایندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشدگیاه، چرخه موادمغذی و غیره در این مدل مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند (Mahmoudi et al., 2021). مدل SWAT، یکی از ابزارهای ارزیابی پیشرفته در علوم آب و خاک، به‌طور گسترده برای تحلیل تاثیرات تغییرات مدیریتی زمین بر منابع آبی در حوضه‌های پیچیده به‌کار می‌رود. این مدل با در نظر گرفتن تغییرات مکانی ویژگی‌های آبخیز نظیر کاربری اراضی، ارتفاع و خصوصیات خاک، توانایی زیادی در شبیه‌سازی و ارزیابی دارد. کاربرد این مدل در مناطق مختلف دنیا روندی چشمگیر داشته و به‌ویژه در سال‌های اخیر برای شبیه‌سازی رواناب، فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز و همچنین تحلیل مؤلفه‌های آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله اطلاعات مکانی مورد نیاز مدل SWAT، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) است که در استخراج مشخصات هیدروگرافی حوضه، برآورد توزیع مکانی رواناب و بار رسوب نقش دارد. ارزیابی توانایی مدل‌های آبخیز در شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی با تحلیل حساسیت پارامترها، تنظیم و صحت‌سنجی مدل صورت می‌گیرد (Goodarzi et al., 2016). در مدل SWAT نیز برای آنالیز حساسیت، واسنجی و آنالیز عدم قطعیت از الگوریتم SUFI-2 استفاده می‌شود (Abbaspour et al., 2007). مدل SWAT توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا طراحی شده است تا تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف را بر جریان آب، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت، در بازه‌های زمانی طولانی پیش‌بینی کند Neitsch et al. (2002) و کاربرد آن در زمینه‌های ارزیابی دراز مدت روش‌های مدیریتی متفاوت Tolson و Shoemaker (2004) ارزیابی برنامه‌های زیست‌محیطی و حفاظتی Baffaut et al. (2005)، شبیه‌سازی کیفیت آب و رسوب Abbaspour et al. (2007)، شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژی Schuol et al. (2006)، شبیه سازی رسوب روزانه Gholami (2003) تأیید گردیده است. تا به حال تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی بارش –رواناب در حوضه خرسان انجام نشده است، این حوضه نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و صنعت کشور دارد. علاوه بر این، رواناب‌های این حوضه در نهایت به سد کارون سه منتهی می‌شوند. بنابراین، هدف این مطالعه استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز خرسان است تا روند بارش–رواناب شبیه‌سازی شده و عوامل مؤثری که بر تولید رواناب تأثیرگذارند شناسایی شوند.

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبخیز خرسان به‌عنوان یکی از زیرآبخیزهای مهم حوضه بزرگ کارون در جنوب غربی ایران و در استان‌های کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری و اصفهان قرار دارد. این حوضه بین عرض جغرافیایی ′۱۶ °۳۰ تا ′۳۳ °۳۱ و طول جغرافیایی ′۱۷ °۵۰ تا ′۰۰ °۵۲ واقع گردیده است. مساحت این حوضه ۹۰۵۳/۱۴ کیلومترمربع است که رودخانه بشار به طول حدود ۱۸۰ کیلومتر آنرا زهکشی می‌کند. بلندترین نقاط ارتفاعی حوضه در رشته کوه‌های دنا با ارتفاع بالای ۴۴۰۶ و کمترین آن در خروجی حوضه با ارتفاع ۷۸۰ متر می‌باشد. با توجه به وسعت آبخیز و وجود رشـته کوه‌های مرتفع زاگرس، اقلیم منطقه در نقاط مختلف آن متغیر بوده، به‌طوری‌که جنوب تا شـــمال غرب اقلیم نیمه مرطوب معتدل تا نیمه مرطوب سرد، دامنه‌ها و نواحی هم‌بار شمال شرق، اقلیم نیمه خشک سرد و ارتفاعات فوقانی دارای اقلیم مرطوب سرد می‌باشد. شکل (۱) موقعیت این حوضه را نشان می‌دهد.

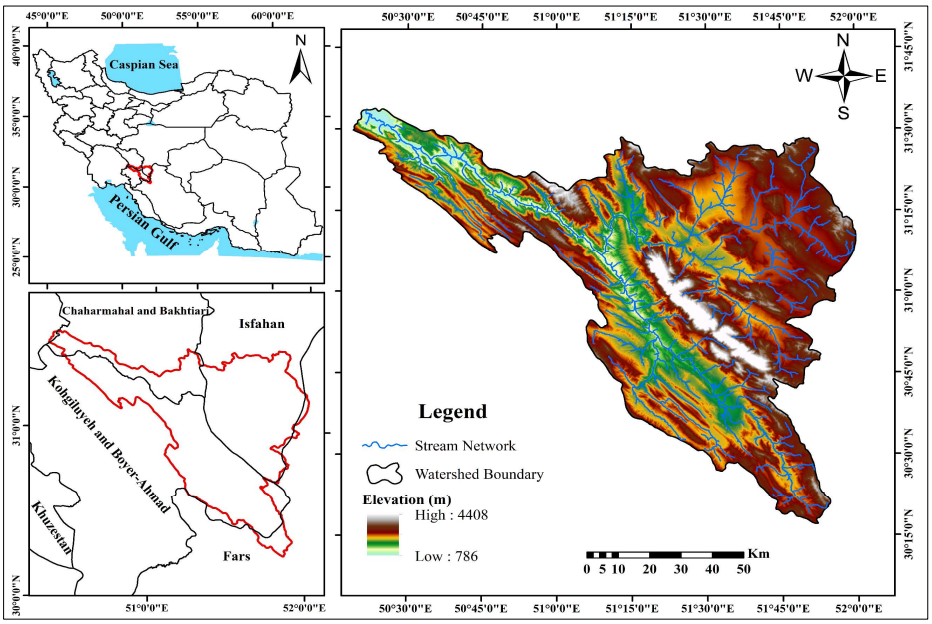



**Fig. 1- Location of Khersan Watershed in Iran**

**شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز خرسان در استان و ایران**

## روش تحقیق

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مدل SWAT نیاز به دو گروه داده، شامل داده‌های مکانی و داده‌های هواشناسی می‌باشد که روش تهیه آن‌ها در زیر اشاره شده است (Kurbah and Jain, 2017).

### داده‌های مکانی

مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model): مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه آبخیز با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر حاصل از ماهواره SRTM از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) اخذ گردید و نواقص احتمالی (پیسکل‌های جا افتاده) در نرم‌افزار ArcGIS برطرف شد. لایه طبقات شیب حوضه آبخیز نیز از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد.

**کاربری اراضی:** برای تهیه لایه کاربری اراضی حوضه آبخیز از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI (Operational Land Imager) استفاده شد. به این منظور ابتدا تصاویر بر مبنای شماره ردیف و گذر حوضه آبخیز در سال ۲۰۲۱ دانلود شد (جدول ۱).

سپس تصحیح رادیومتریک برای تبدیل رادیانس به بازتاب سطحی بالای اتمسفر انجام شد. همچنین تصحیح اتمسفری تصاویر نیز بر اساس روش تجزیه و تحلیل سریع خطدید اتمسفر از طریق طیف ابر مکعب (FLAASH) در محیط نرم افزار ENVI 5.6 انجام گردید. بعد از انجام تصحیحات اقدام به موزاییک کردن تصاویر شد و سپس ترکیب رنگی مناسب انتخاب گردید. در مرحله بعدی پس از انتخاب مناطق تعلیمی از تصاویر با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال (Maximum Likelihood Classification) که دقت بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد طبقه‌بندی تصاویر انجام شد. نقاط کنترل زمینی (Ground Control Point) حاصل از بازدیدهای میدانی که به‌صورت نظام‌مند و به تعداد ۳۰ نمونه برای هر کاربری با دستگاه GPS برداشت و درستی نمونه‌ها تأیید شد. نقشه‌های تولیدی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 اصلاح و در نهایت نقشه کاربری اراضی تهیه گردید. دقت طبقه‌بندی تصاویر نیز با استفاده از ضریب کاپا بر مبنای روابط زیر محاسبه شد:

$$k = \frac{\emptyset_1 - \emptyset_2}{1 - \emptyset_2} \quad (۱)$$

$$\emptyset_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} Pij \quad (۲)$$

$$\emptyset_2 = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{m} Pi.\,xPj \quad (۳)$$

که در آن، Pij: عناصر قطر اصلی، m: تعداد کلاس‌ها، N: تعداد کل نمونه‌های آزمایشی در تمام طبقات، Pi: جمع ستون‌ها و Pj: جمع ردیف می‌باشد.

**لایه خاک‌شناسی:** لایه خاک‌شناسی بر اساس نقشه خاک جهانی تولید شده توسط فائو (سازمان خوار و بار و کشاورزی جهانی) برای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. لایه خاکشناسی در پنج گروه خاک (بر اساس گروه هیدرولوژیک خاک، تعداد لایه‌های خاک، بافت خاک، مواد آلی خاک و ...) به مدل معرفی شد، مشخصات لایه خاک در جدول (۲) آمده است.

 *DOI:* 10.22055/jise.2025.48844.2154

**داده‌های هواشناسی**

گروه دوم داده‌های مورد نیاز مدل SWAT داده‌های هواشناسی است که شامل، داده‌های بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد و رطوبت نسبی در مقیاس روزانه از ۱۴ ایستگاه هواشناسی (۱۱ ایستگاه باران‌سنجی، سه ایستگاه سینوپتیک) موجود در حوضه در بازه زمانی ۱۳۷۶/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۹/۰۶/۳۰ به مدل وارد شد. همچنین داده‌های مربوط به جریان رودخانه از سه ایستگاه آب‌سنجی واقع در مناطق مختلف و خروجی حوضه اخذ گردید (جدول ۳).

به‌منظور اجرای مدل SWAT ابتدا با استفاده از الحاقیه ArcSWAT در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه به نرم‌افزار اضافه شد. سپس محدوده آبخیز، زیرحوضه‌ها، شبکه آبراهه‌های اصلی و سایر خصوصیات فیزیکی آبخیز توسط مدل محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و نقشه خاک و همین‌طور معرفی طبقات مقدار شیب در آبخیز، واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (Hydrologic Response Units) توسط مدل تعریف شدند. بعد از تهیه نقشه HRUs داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت متوسط باد و رطوبت نسبی در فرمت قابل قبول به مدل معرفی و مدل‌سازی انجام گردید. در این تحقیق از ایستگاه مرجع یاسوج برای داده‌های هواشناسی استفاده گردید.

**جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این تحقیق**

**Table 1- Characteristics of satellite images used in this research**

| Sattelite Name | Sensor | Bands | Row | Path | Date |
|---|---|---|---|---|---|
| Landsat 8 | OLI | 11 | 38 | 163 | 29/04/2020 |
| | | | 39 | 163 | |
| | | | 38 | 164 | |
| | | | 39 | 164 | |

**جدول ۲- مشخصات لایه خاک مورد استفاده در اجرای مدل SWAT**

**Table 2 - Soil Layer Specifications Used in the Implementation of the SWAT Model**

| Row | Soil Code | Name | Soil Texture | k Value |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3122 | I-Rc-Xk-c-3122 | Loam | 0.3204 |
| 2 | 3508 | I-Rc-Yk-c-3508 | Loam | 0.3061 |
| 3 | 3578 | Xk5-2-3a-3578 | Clay-Loam | 0.3601 |
| 4 | 3254 | Rc33-3bc-3254 | Loam | 0.3244 |
| 5 | 3304 | Xk5-3ab-3304 | Clay-Loam | 0.3562 |

**جدول ۳- مختصات ایستگاه‌های مورد استفاده در منطقه**

**Table 3 - Coordinates of the Stations used in the Area**

| Number | Station Name | Station Type | Longitude | Latitude |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Ganjaei | Raingauge | 51 36 00 | 30 46 00 |
| 2 | Garmook | Raingauge | 51 43 00 | 31 22 59 |
| 3 | Ghale Raeisi | Raingauge | 50 38 59 | 31 16 59 |
| 4 | Gifteh | Raingauge | 51 40 00 | 30 55 58 |
| 5 | Hanna | Raingauge | 51 43 48 | 31 13 00 |
| 6 | Kaloos | Raingauge | 51 27 00 | 30 37 50 |
| 7 | Komeh | Raingauge | 51 36 00 | 31 04 00 |
| 8 | Maymand | Raingauge | 51 16 00 | 31 08 50 |
| 9 | Pataveh | Raingauge | 51 14 48 | 30 56 54 |
| 10 | Setnegan | Raingauge | 51 37 00 | 30 36 00 |
| 11 | Sisakht | Raingauge | 51 21 00 | 30 52 56 |
| 12 | Yasuj | Synoptic | 51 33 16 | 30 42 11 |
| 13 | Semirom | Synoptic | 51 33 56 | 31 24 23 |
| 14 | Sisakht | Synoptic | 51 27 45 | 30 50 59 |
| 15 | Pataveh | Hydrometric | 51 15 16 | 30 57 36 |
| 16 | Kata | Hydrometric | 51 15 33 | 31 10 59 |
| 17 | Barez | Hydrometric | 50 28 26 | 31 28 30 |

### مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل در مقیاس حوضه و نیمه توزیعی است که توسط Arnold et al. (1998) توسعه یافته است. این مدل قادر به شبیه‌سازی تأثیر شیوه‌های مختلف مدیریتی روی آب، رسوب، آلاینده‌های کشاورزی در حوضه‌های آبخیز با انواع خاک و کاربری‌های مختلف است. این مدل حوضه را به چند زیرحوضه و هر زیرحوضه را به تعداد زیادی واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) با توجه به پارامترهای توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک تقسیم می‌شود. رواناب سطحی از بارش روزانه با روش شماره منحنی برآورد می‌شود. فرسایش و رسوب در هر HRUs بر اساس معادله تلفات خاک اصلاح شده ماسل، و رسوب در کانال براساس معادله انتقال رسوب اصلاح شده بگنولد محاسبه می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی انتقال مواد مغذی در SWAT عوامل مختلفی چون معدنی شدن، تجزیه و عدم تحرک نیتروژن و فسفر، میزان فرسایش و رسوب در هر واحد هیدرولوژیکی، نحوه انتقال آب، رسوبات، مواد مغذی از طریق شبکه رودخانه‌ای و مکانیسم‌های پراکندگی و فرا رفت را در نظر می‌گیرد. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شامل نقشه رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشد که هر سه باید در قالب رستری به مدل ارائه شوند، سایر اطلاعات مورد نیاز مدل شامل داده‌های هواشناسی از قبیل بارندگی روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و کانال، برداشت آب، مدیریت اراضی، مخازن و برخی زمینه‌های دیگر با توجه به هدف تحقیق باید در مدل وارد شوند (Neitsch et al., 2011).

### شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. همچنانکه یک سیستم با گذشت زمان تکوین می‌یابد، رفتار آن با ایجاد مدل شبیه‌سازی بررسی می‌شود. این مدل، معمولاً به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به عملکرد سیستم است. این فرض‌ها در چارچوب رابطه‌های ریاضی، منطقی و نمادین بین نهاده‌ها یا اهداف مورد نظر سیستم بیان می‌شود (Sadoun, 2000).

### واسنجی

هدف از واسنجی حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است. هر مدل پردازشی تعدادی پارامتر دارد که مقادیر آن‌ها باید برای حوضه خاصی که مدل‌سازی خواهد شد تعیین شود در حالت عادی و برای مدل‌هایی با فرمول‌بندی خوب هر پارامتر را می‌توان با اندازه‌گیری‌های مستقیم تعیین نمود (Mai, 2023). مقدار هر پارامتر برای استفاده مدل برای تخمین هیدروگراف‌های رواناب یا روندیابی باید مشخص شود. برخی از مدل‌ها پارامترهایی دارند که توسط مشاهده یا اندازه‌گیری خصوصیات حوضه آبخیز یا کانال تخمین زده نمی‌شوند. پس چگونه می‌تواند مقادیر مناسب برای پارامترها انتخاب شود؟ اگر مشاهدات بارندگی و دبی موجود باشند واسنجی یک پاسخی برای این سوال است. واسنجی داده‌های آب و هواشناسی مشاهده شده را در یک جستجوی منظم برای پارامترهایی که بهترین تناسب نتایج محاسبه شده با رواناب مشاهده شده را می‌دهد به کار می‌برد. این جستجو اغلب بهینه‌سازی یا واسنجی نامیده می‌شود (White et al., 2003).

### آنالیز حساسیت

پارامترهایی که در حل نهایی تأثیر دارند تعیین می‌شوند. باید توجه داشت که در طول واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به بقیه حساس‌ترند. یک پارامتر حساس پارامتری است که تأثیر بیشتری روی خروجی مدل دارد بنابراین اگر مقدار یک پارامتر حساس به آرامی تغییر کند تأثیر زیادتری در پیشگویی مدل خواهد داشت (Li et al., 2021). در آنالیز حساسیت تخمین دقیق یک پارامتر حساس از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار حساسیت هر پارامتر نسبت به تابع هدف تخمین زده می‌شود، مقدار تابع هدف برای هر پارامتر ۰/۹۹۵ و ۱/۰۰۵ برابر مقدار بهینه است و از معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$S = \frac{0.995X - .005X}{X} \quad (۴)$$

S: میزان حساسیت

X: مقدار بهینه پارامتر معرفی شده جهت آنالیز حساسیت

مقدار حساسیت، درصد تغییرات در مقدار تابع هدف حاصل از افزایش یک درصدی در مقدار پارامتر است (HEC, 2000). جهت واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است. شکل (۲) فرآیند اجرای مدل را نشان می‌دهد.

### معیارهای سنجش واسنجی مدل

ارزیابی عملکرد مدل به‌صورت بصری هیدروگراف‌های جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و با استفاده از مقایسه‌های آماری انجام گردید. برای مقایسه آماری بین جریان مشاهده‌شده (OBS) و جریان شبیه‌سازی‌شده (SIM) در مقیاس زمانی روزانه، از ضریب همبستگی ($R^2$)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE) بر اساس روابط زیر استفاده شد (Phetanan et al., 2024):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - \overline{SIM})(OBS_i - \overline{OBS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - \overline{SIM})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - \overline{OBS})^2}} \quad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n}(OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - OBS_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - \overline{OBS})^2}\right] \quad (۷)$$

که در آن‌ها n تعداد کل جفت داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است و $\overline{OBS}$ و $\overline{SIM}$ نشان‌دهنده مقدار متوسط

*DOI:* 10.22055/jise.2025.48844.2154

داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشند. NSE مقدار خطا عدم توافق بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را اندازه‌گیری می‌کند. Legates و McCabe Jr (1999) دریافتند که NSE از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقادیر بالاتر نشان دهنده توافق بهتر است و $R^2$ میزان همبستگی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را اندازه‌گیری می‌کند.

## نتایج و بحث

مدل SWAT با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، داده‌های بارندگی، دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، سرعت باد اجرا گردید. در ادامه با استفاده از الگوریتم SUFI2 نتایج مدل واسنجی و اعتبارسنجی شد. آنالیز حساسیت مدل نیز با استفاده از ۲۳ پارامتر که از پیش فرض‌های مدل هستند، انجام شد و نتایج نشان داد که ۱۶ پارامتر حساسیت بیشتری دارند و بقیه پارامترها تأثیری بر شبیه‌سازی رواناب حوضه نداشته و به‌عنوان پارامترهای غیرحساس در نظر گرفته شدند و از مرحله واسنجی حذف شدند در مدل SWAT، p-value و t-stat معمولاً در فرآیند تحلیل حساسیت و واسنجی مدل به کار می‌روند. مقدار t-stat نشان‌دهنده میزان تأثیر یک پارامتر بر خروجی مدل است، به این معنا که هرچه مقدار t-stat بزرگ‌تر باشد، آن پارامتر تأثیر بیشتری بر نتایج مدل دارد. از سوی دیگر، مقدار p-value برای تعیین معناداری آماری این تأثیر استفاده می‌شود؛ اگر مقدار p-value کمتر از یک سطح آستانه (مثلاً ۰/۰۵) باشد، نشان‌دهنده این است که تأثیر آن پارامتر بر مدل معنادار است (جدول ۴).

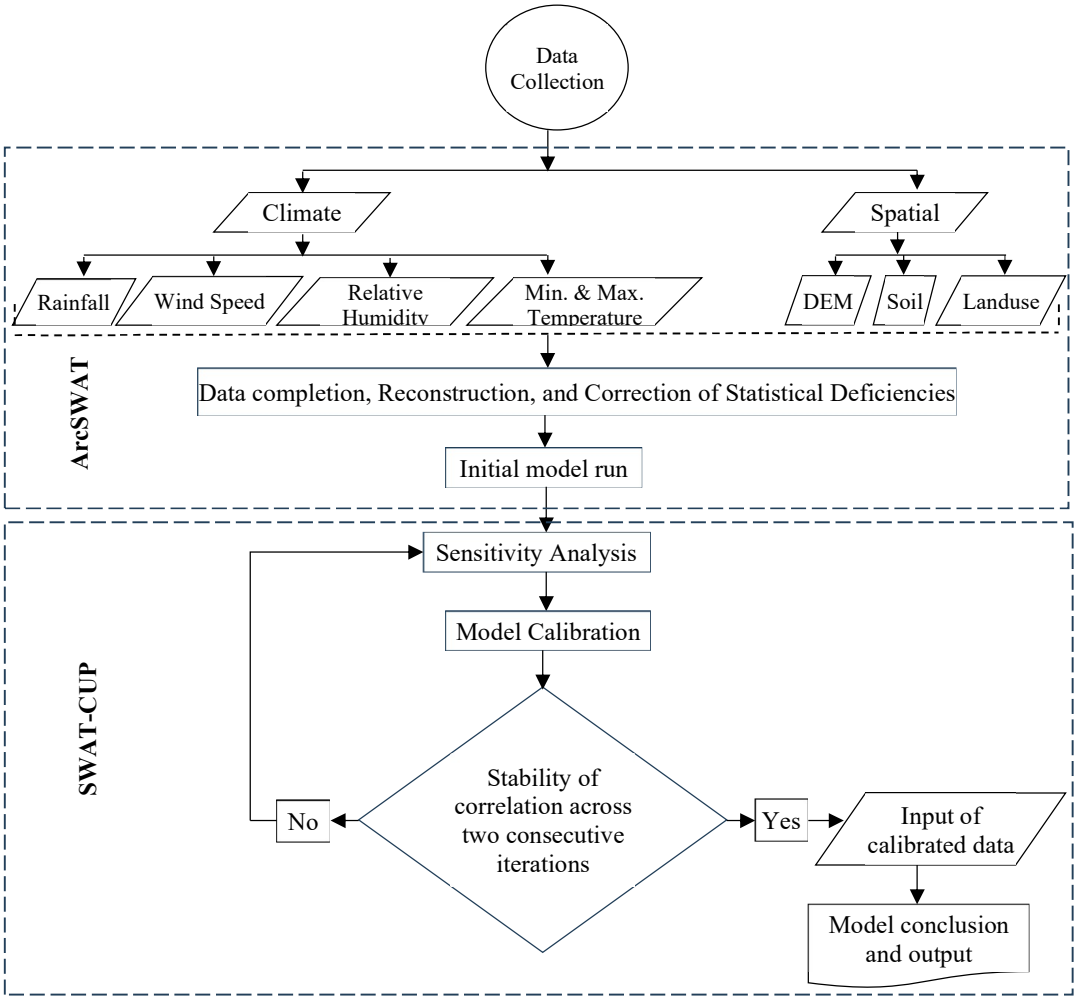



**Fig. 2 - Flowchart of the Research Process**

**شکل ۲- نمودار جریانی انجام پژوهش**

**جدول ٤- بازه پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی فرآیند بارش – رواناب در مدل SWAT**

**Table 4- Range of Effective Parameters in Simulating Rainfall-Runoff Processes in the SWAT Model**

| Row | Parameters | Discription | Minimum | Maximum | p-value | t-stat |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | R*__CN2.mgt | SCS curve number for moisture condition II | -0.20 | 0.20 | 0.000 | -8.013 |
| 2 | V**__ALPHA_BF.gw | Base flow alpha factor (days) | 0 | 1 | 0.002 | -0.889 |
| 3 | V__GW_DELAY.gw | Groundwater delay time (days) | 30 | 450 | 0.285 | -0.609 |
| 4 | R__SOL_BD(..).sol | Moist bulk density ($gcm^{-3}$) | -0.30 | 0.30 | 0.004 | -2.249 |
| 5 | R__SOL_AWC(..).sol | Available water capacity of the soil layer (mm/mm) | -0.30 | 0.30 | 0.338 | 0.867 |
| 6 | R__SOL_K(..).sol | Soil saturated hydraulic conductivity (mm/hr) | -0.80 | 0.80 | 0.000 | -3.567 |
| 7 | R__SOL_ALB(..).sol | Soil albido coefficient | -0.50 | 0.50 | 0.180 | -0.879 |
| 8 | V__GW_DELAY.gw | Groundwater delay time (days) | 0 | 500 | 0.000 | 3.043 |
| 9 | V__REVAPMN.gw | Depth of water threshold in groundwater table | 0 | 100 | 0.411 | 0.314 |
| 10 | V__SMTMP.bsn | Snow melt base temperature (°C) | -5 | 5 | 0.745 | -0.42 |
| 11 | V__SMFMX.bsn | Melt factor for snow on June 21 (mm/°C-day) | 0 | 10 | 0.052 | 0.849 |
| 12 | V__ALPHA_BNK.rte | Baseflow alpha factor for bank storage (days) | 0 | 1 | 0.061 | -1.603 |
| 13 | V__CANMX.hru | Maximum canopy storage (mm) | 0 | 100 | 0.025 | -2.51 |
| 14 | R__HRU_SLP.hru | Average Slope (m/m) | 0 | 0.90 | 0.062 | -1.817 |
| 15 | R__SOL_Z(..).sol | Depth from soil surface to bottom of layer (mm) | 0 | 0.80 | 0.045 | 1.538 |
| 16 | V__GWQMN.gw | Thershold water level in shallow aquifer for baseflow (mm) | 0 | 5000 | 0.837 | 0.194 |

*: V means that the parameter value is replaced with a new optimal value.
**: R means that the parameter is multiplied by (1 + the optimal value)

با توجه به نتایج جدول (۴) تعداد ۱۶ پارامتر حساس و مهم در شبیه‌سازی رواناب با مدل SWAT در حوضه خرسان مؤثر بودند. در مطالعه‌ای که Rostamian et al. (2008) با هدف به‌کارگیری مدل SWAT در کل حوضه‌های ایران داشتند تعداد ۲۲ پارامتر حساس در شبیه‌سازی رواناب تشخیص دادند. نتایج مدل SWAT در شبیه‌سازی روزانه فرآیند بارش–رواناب در ایستگاه خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری بارز) در شکل (۳) ارائه شده است.

*DOI:* 10.22055/jise.2025.48844.2154

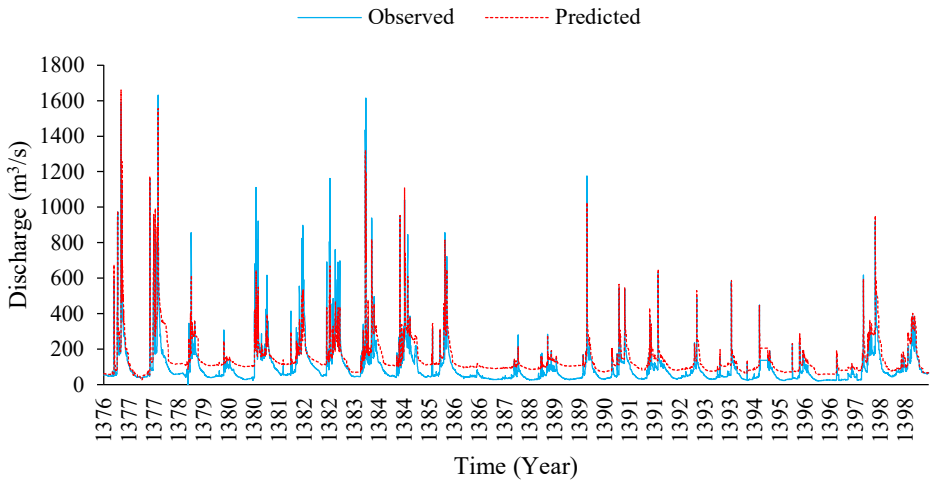



**Fig. 3 - Prediction of stream discharge at the outlet station of the Khersan watershed using the SWAT model.**

**شکل ۳- پیش‌بینی میزان دبی جریان ایستگاه خروجی حوضه خرسان با استفاده از مدل SWAT**

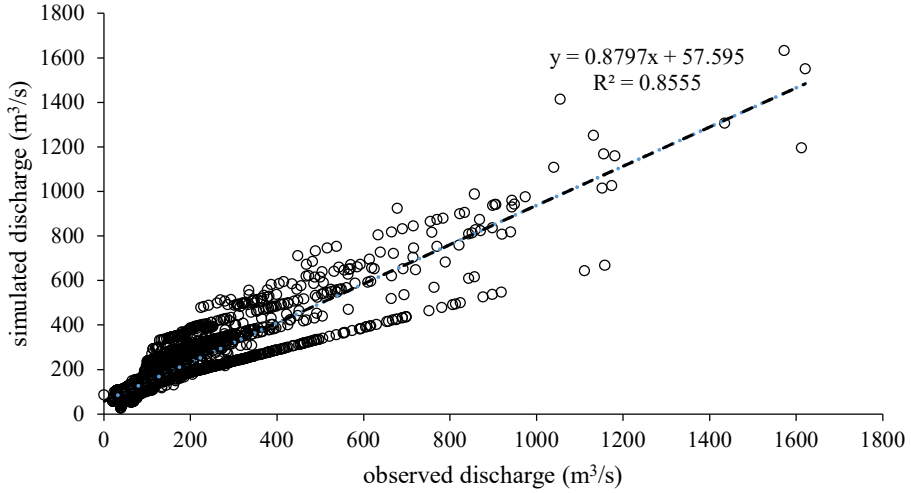



**Fig. 4 - Prediction of stream discharge at the outlet station of the Khersan watershed using the SWAT model.**

**شکل ٤- پیش‌بینی میزان دبی جریان ایستگاه خروجی حوضه خرسان با استفاده از مدل SWAT**

با توجه به شکل (۳)، مدل SWAT نتوانسته است جریان پایه را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کند و مقدار آن را بیش از حد واقعی برآورد کرده است. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی جریان‌های با حجم بالا نیز ضعف‌هایی مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که مقدار جریان‌های بالا کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. این ناهماهنگی ممکن است ناشی از چند عامل باشد. از مهمترین دلایل آن کمبود داده‌های دقیق و معتبر برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز ممکن است تأثیرگذار بوده باشد. همچنین، عدم در نظر گرفتن کافی شرایط محلی، نظیر ویژگی‌های خاص خاک و پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، ممکن است به کاهش دقت مدل منجر شده باشد. در نهایت، روش‌های مدیریتی خاص یا تغییرات آب‌وهوایی نیز ممکن است در نتایج مدل اثرگذار بوده و باعث انحراف از واقعیت شوند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد که نشان از نتایج قابل قبول مدل برای حوضه خرسان می‌باشد (شکل ۴). به‌منظور ارزیابی مدل از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی ($R^2$)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE) استفاده شد که نتایج آن در زیر ارائه شده است (جدول ۵).

**جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل SWAT برای دوره واسنجی (۱۳۹۲-۱۳۷۶) و اعتبارسنجی (۱۳۹۹-۱۳۹۳)**

**Table 5 - Results of the SWAT Model Evaluation for the Calibration (1997-2013) and Validation Period (2014-2020)**

| Statistical | Calibration | Validation |
|---|---|---|
| $R^2$ | 0.85 | 0.91 |
| RMSE | 18.01 | 53.93 |
| NSE | 0.72 | 0.36 |

با توجه به اینکه شاخص ناش – ساتکلیف برای مقادیر بیشتر از ۰/۷۵ بیانگر دقت بالا و عالی مدل است و مقدار بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ بیان‌گر نتایج رضایت‌بخش بوده و اگر مقدار این معیار کمتر از ۰/۳۶ باشد نتایج غیرقابل قبول فرض می‌شوند (Ndomba and Birhanu, 2008). Kurbah و Jain (2017) عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی روزانه و ماهانه بارش–رواناب بر اساس ضریب ناش–ساتکلیف را به‌ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۷۲۴، ۰/۷۶۵، ۰/۸۷ و ۰/۸۸ به‌دست آوردند که نشان از عملکرد خوب این مدل در شبیه‌سازی دارد. همچنین Kangsabanik و Murmu (2017) بیان داشتند که مدل SWAT با ضریب همبستگی ۰/۹۴۱ عملکرد خوبی در شبیه‌سازی بارش – رواناب نشان می‌دهد. بر اساس جدول (۵) عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی بارش–رواناب در حوضه مورد مطالعه از عملکرد خوبی برخودار است و می‌تواند در مطالعه‌های برآورد میزان رواناب در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

## نتیجه‌گیری

در مطالعه‌های منابع آب، رواناب مهمترین متغیر هیدرولوژیکی مورد استفاده است. برآورد رواناب مستقیم برای حوضه‌های آبخیز فاقد آمار کاری دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است. مدل‌های زیادی برای هیدرولوژی حوضه توسعه داده شد، تا حجم رواناب تولیدی در حوضه را شبیه‌سازی کنند. اما در دسترس بودن داده‌های زمانی و مکانی محدودیت اصلی مانع اجرای این مدل‌ها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مثل کشورمان است. مدل هیدرولوژیکی SWAT یکی از گزینه‌های مناسب برای این منظور است. این مدل قابلیت استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارا بوده و با ادغام با مدل‌های مناسب بارش–رواناب، ابزار کاربردی و ایده‌آلی برای تخمین حجم رواناب مستقیم فراهم می‌کند. در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. حوضه آبخیز خرسان در استان کهگیلویه و بویراحمد یکی از زیرحوضه‌های حوضه کارون بزرگ است که از نظر منابع آب در کشور اهمیت بالایی دارد. به منظور شبیه‌سازی بارش–رواناب و تعیین مؤلفه‌های مهم در آن از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) استفاده گردید. مدل SWAT برای دوره ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ با استفاده از الگوریتم SUFI2 به‌طور خودکار کالیبره شد و در دوره ۱۳۷۶–۱۳۹۲ واسنجی و ۱۳۹۹–۱۳۹۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که از ۲۳ پارامتر مهم در واسنجی آن در این حوضه ۱۶ پارامتر مؤثر شامل CN2 (شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II))، ALPHA_BF (ثابت تخلیه آب زیرزمینی)، GW_DELAY (زمان تأخیر انتقال آب از آخرین لایه به آب زیرزمینی)، SOL_BD (چگالی توده خاک)، SOL_AWC (ظرفیت آب قابل دسترس خاک)، SOL_K (هدایت هیدرولیکی اشباع خاک)، SOL_ALB (ضریب بازتاب (آلبیدو) خاک مرطوب)، GW_DELAY (زمان تأخیر آب زیرزمینی)، REVAPMN (ضریب تبخیر آب زیرزمینی)، SMTMP (دمای ذوب برف)، SMFMX (حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال)، ALPHA_BN (ثابت تخلیه کانال)، CANMX (حداکثر نگهداشت تاج پوشش)، HRU_SLP (میانگین شیب) و SOL_Z (ضخامت لایه‌های خاک) وجود دارد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهای RMSE، $R^2$ و NSE نشان می‌دهد که در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقدار RMSE بترتیب ۱۸/۰۱ و ۵۳/۹۳ می‌باشد. مقدار ضریب $R^2$ نیز برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۹۱ و مقدار ضریب ناش–ساتکلیف (NSE) برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی بترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۳۶ می‌باشد. در مجموع با در نظر گرفتن سه معیار ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه مورد مطالعه از عملکرد خوبی برخوردار است که پیشنهاد می‌شود در مطالعه‌های مدیریت منابع آب و برآورد حجم رواناب تولیدی در حوضه مذکور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مطالعات آتی به موضوع تخصیص منابع آب در حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل SWAT اقدام نمایند.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه کد ۰۴-۱۴۰۰-۱ صورت گرفته است.

## دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

## پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

## اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

## مشارکت نویسندگان

**نویسنده اول:** کاکا شاهدی، راهنمایی، مشاوره، کنترل نتایج، ویرایش.

**نویسنده دوم:** حسین روشان، نگارش، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری.

**نویسنده سوم:** علی شاهنظری، مشاوره.

**نویسنده چهارم:** مهدی قربانی فرد، جمع آوری داده.

## تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان از همکاری و مساعدت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و تأمین مالی این پژوهشکمال تشکر و قدردانی را دارند.

## References

1- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. & Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology, 333*(2-4), pp. 413-430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.

2- Achite, M., Mohammadi, B., Jehanzaib, M., Elshaboury, N., Pham, Q. B., & Duan, Z. 2022. Enhancing rainfall-runoff simulation via meteorological variables and a deep-conceptual learning-based framework. *Atmosphere, 13*(10), pp. 1688. https://doi.org/10.3390/atmos13101688.

3- Anwar, N. S. 2010. Simulated Impact of land use dynamics on Hydrology during a 20-ear-Preiod of deles basin in Ethiopia. TRITA-LWR Master Thesis, Department of Land and Water Resources Engineering Royal Institute of Technology (KTH).

4- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34*(1), pp. 73-89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

5- Baffaut, C., Farrand, T. D. & Benson, V. W. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on noncalibrated SWAT simulations. *3rd International SWAT Conference, Zurich, Switzerland,* 301-309.

6- Gholami, Sh. 2003. Daily sediment simulation model using SWAT distribution model in mountain watersheds (Emame watershed). *Research and Construction Quarterly, 16*(2), pp. 28-33. (In Persian).

7- Goodarzi, M., Zahabiyoun, B., & Massah Bavani, A. 2016. Simulation of Rainfall-Runoff for Gharesou Watershed Using SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Technology, 18*(2), pp. 12-20. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9797.html (In Persian).

8- He, C. 2003. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. *Environmental Modelling & Software, 18*(8-9), pp. 809-813. https://swatplus.gitbook.io/docs/..

9- Hydrologic Engineering Center (HEC). 2000. *Hydrologic modeling system HEC–HMS*: technical reference manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif..

10- Kangsabanik, S., & Murmu, S. 2017. Rainfall-runoff modelling of Ajay river catchment using SWAT model. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 67(1), 012033. IOP Publishing.

11- Kumar, A., Kanga, S., Taloor, A. K., Singh, S. K., & Đurin, B. 2021. Surface runoff estimation of Sind River basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. *HydroResearch, 4*, pp. 61-74. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001.

12- Kurbah, S., & Jain, D. M. K. 2017. Rainfall-runoff modeling of a river basin using SWAT model. *International Journal of Engineering Research & Technology, 6*(12), pp. 293-302.

13- Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research, 35*(1), pp. 233-241. https://doi.org/10.1029/1998WR900018.

14- Li, M., Di, Z., & Duan, Q. 2021. Effect of sensitivity analysis on parameter optimization: Case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China. *Journal of Hydrology,* 603, pp. 1-17. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126896.

15- Mahmoudi, P., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. 2021. Surface Runoff Simulation Based on SWATCUP Sensitivity Analysis Method (Case study: Ghareh-Chay River). *Nivar, 45*(112-113), pp. 46-58. https://doi.org/10.30467/nivar.2021.261833.1173 (In Persian).

16- Mai, J. 2023. Ten strategies towards successful calibration of environmental models. *Journal of Hydrology,* 620, pp. 1-24. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129414.

17- Moradi, A., Najafinejad, A., Ownegh, M., & Komaki, C. B. 2019. Assessment of the impacts of different Digital Elevation Models on runoff and suspended sediment estimations using SWAT model (Case Study: Galikesh watershed, Golestan Province). *Watershed Engineering and Management, 11*(1), pp. 62-75. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.118433 (In Persian).

18- Ndomba, P. M., & Birhanu, B. Z. 2008. Problems and prospects of SWAT model applications in Nilotic catchments: a review. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine, 1*, pp. 41-52..

19- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, R. Srinivasan, & Williams, J. R. 2002. *Soil and water assessment tool: User's Manual.* Published 2002 by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas TWRI Report TR-192.

20- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., & Williams, J.R. 2011. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation: Version 2009*. Texas Water Resources Institute, Technical Report No. 406, Texas A&M University System, Collage Station, Texas 77843-2118.

21- Phetanan, K., Hong, S. M., Yun, D., Lee, J., Chotpantarat, S., Jeong, H., & Cho, K. H. 2024. Enhancing flow rate prediction of the Chao Phraya River Basin using SWAT–LSTM model coupling. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 53*, pp. 1-19. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101820.

22- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & shafieimehr, M. 2021. Calibration and validation the SWAT model in the simulation of runoff and sediment in Shahr Chai of Miyaneh. *Journal of Geography and Planning, 25*(76), pp. 129-139. https://doi.org/10.22034/gp.2020.40775.2656.

23- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. C. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal, 53*(5), pp. 977-988. https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977.

24- Sadoun, B. 2000. Applied system simulation: a review study. *Information Sciences, 124*(1-4), pp. 173-192. https://doi.org/10.1016/S0020-0255(99)00079-1.

25- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Reichert, P., Srinivasan, R., Schar, Ch., & Zehnder, A. J. B. 2006. Estimation of freshwater availability in the West African Sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of hydrology, 352*(1-2), pp. 30-49. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025.

26- Singh, V. P. 1995. *Computer models of watershed hydrology.* 1-22. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

27- Tolson, B. A. & Shoemaker, C. A. 2004. *Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir.* Version 1.0. Technical Report, School of Civil and .Environmental Engineering, Cornell University., Ithaca, New York, 159 p..

28- Xue, H., Liu, J., Dong, G., Zhang, C., & Jia, D. 2022. Runoff Estimation in the Upper Reaches of the Heihe River Using an LSTM Model with Remote Sensing Data. *Remote Sensing, 14*(10), pp. 2488. https://doi.org/10.3390/rs14102488.

29- White, L. W., Vieux, B., Armand, D., & LeDimet, F. X. 2003. Estimation of optimal parameters for a surface hydrology model. *Advances in water resources, 26*(3), pp. 337-348. https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00189-6.

30- Yaghoubi, F., & Bahremand, A.R. 2011. Streamflow Simulation using Spatially Distributed Hydrologic Model, WetSpa in Chehel-Chai Watershed in Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation, 18*(3), pp. 185-207. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1390.18.3.11.9 (In Persian)..

31- Zand, M., & Samaei, R. 2017. Investigation on Amount and Intensity of Rainfalls in Flood Generation in Khorramabad Basin. *Nivar, 41*(96-97), pp. 1-8. https://doi.org/10.30467/nivar.2017.44813 (In Persian).