

Sensitivity and uncertainty analysis of hydrological parameters of the Rafsanjan plain using the SWAT model

Farzaneh Dehghani Ghanatghehstani¹, Saeid Akbarifard², Atefeh Jafarpour³, Mohammad Zounemat-Kermani^{4*}

¹ M.Sc. student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

³ Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Extended Abstract

Introduction

Rafsanjan Plain, an arid region of Iran, has experienced groundwater depletion and significant hydrological changes in recent decades. This study applied the semi-distributed, process-based SWAT model to simulate hydrological processes and estimate the water balance. Spatial inputs (DEM, land use, soil type, slope) and daily climate data (precipitation, temperature, humidity, wind, solar radiation) for 2002–2024 were used. The watershed was divided into sub-basins and HRUs, and the model was calibrated and validated using SUFI-2 in SWAT-CUP, with sensitivity and uncertainty analyses conducted. Results indicated that curve number, saturated hydraulic conductivity, and baseflow parameters most influenced streamflow simulation. Model performance was acceptable (P-factor 0.42, R-factor 2.62 in calibration; 0.42 and 0.39 in validation). Over 60% of annual precipitation was lost via evapotranspiration, with surface runoff contributing less than 0.1%. These findings demonstrate SWAT's effectiveness for water resources management and climate impact assessment in arid regions.

Materials and Methods

The Rafsanjan Plain, encompassing 12,513 km² within the Kavir-e Dranjir-Saghand basin, was delineated into 12 sub-basins using a 30-meter Digital Elevation Model. The model configuration incorporated land use/land cover maps (derived from Landsat imagery), soil classification data from the Iranian Soil and Water Research Institute, and slope categories to generate Hydrological Response Units (HRUs) through an overlay process. Daily climatic inputs spanning 2002–2024 included precipitation, maximum/minimum temperature, and relative humidity from the Rafsanjan synoptic station; wind speed and solar radiation were obtained from NASA's POWER database to fill data gaps. Monthly discharge observations from two hydrometric stations facilitated model calibration (2002–2017) and independent validation (2018–2024). The SUFI-2 algorithm in SWAT-CUP performed automated calibration through iterative Latin Hypercube sampling, accounting for parameter uncertainty by bracketing observations within 95% prediction uncertainty bounds. Sensitivity analysis employed the t-test method to rank 27 parameters related to runoff generation, soil water movement, and groundwater flow. Performance evaluation utilized the P-factor (percentage of observations within uncertainty band) and R-factor (average width of uncertainty band normalized by standard deviation), supplemented by coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and root mean square error (RMSE).

Results and Discussion

Global sensitivity analysis identified 27 parameters significantly influencing streamflow simulation, with the curve number (CN2), saturated hydraulic conductivity (SOL_K), and baseflow recession constant exhibiting the highest sensitivity based on t-statistics and p-values (<0.05). Calibration achieved P-factor=0.42 and R-factor=2.62, while validation yielded P-factor=0.42 and R-factor=0.39, indicating acceptable model performance according to ASABE guidelines. Statistical metrics demonstrated strong agreement ($R^2 \approx 0.91$, NSE=0.84) between simulated and observed monthly discharge, though the model overestimated peak flows in extreme years (2006, 2014) due to limited availability of sub-daily precipitation data and simplified representation of runoff generation during high-intensity events. Water balance analysis revealed that 63.2% of mean annual precipitation (142 mm) was lost through actual evapotranspiration, 28.4% contributed to deep aquifer recharge, 7.8% generated surface runoff, and return flow constituted merely 0.08%, characterizing typical hyper-arid hydrology. Baseflow dominated river

discharge during dry months (June-September), comprising 85% of total flow, while snowmelt contributed significantly to spring peaks. Uncertainty analysis demonstrated that parameters controlling runoff partitioning and soil water retention (CN2, SOL_K, soil available water capacity) contributed 68% of total prediction uncertainty. Seasonal patterns showed that precipitation and runoff peaked in March-April, while potential evapotranspiration reached maximum values during June-August. The model's performance in simulating baseflow recession was superior to its representation of quickflow response, reflecting its conceptual structure and parameterization limitations in capturing rapid runoff processes.

Conclusion

This study successfully calibrated and validated the SWAT model for the Rafsanjan Plain, demonstrating its capability to simulate hydrological processes in data-scarce arid environments with acceptable uncertainty levels. The identification of 27 sensitive parameters, particularly CN2 and SOL_K, highlights that accurate characterization of soil hydraulic properties is critical for reducing simulation uncertainty and improving prediction reliability. Quantification of water balance components revealed severe water loss through evapotranspiration (>60%) and minimal groundwater recharge, emphasizing the unsustainable nature of current water use practices and the urgent need for demand management strategies. While the model effectively reproduced seasonal flow patterns and baseflow dynamics ($R^2 \approx 0.91$), overestimation of peak flows indicates limitations in representing extreme rainfall-runoff events, attributable to coarse temporal resolution of precipitation data and simplified infiltration processes. These findings provide a robust scientific foundation for evaluating climate change scenarios, land use change impacts, and water management interventions such as deficit irrigation and artificial recharge. Future research should integrate SWAT with groundwater quality modules to address salinization, incorporate higher-resolution meteorological forcing data, and couple with optimization algorithms to support multi-objective water allocation decisions.

Keywords: Hydrological modelling, Arid zones, Water balance, Kerman Province.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Kerman Regional Water Authority for providing essential hydrological and meteorological datasets that significantly contributed to this research project.

Conflicts of interest

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

Data Availability Statement:

The datasets are available at reasonable request to the corresponding author, subject to institutional data sharing policies and permissions from the Kerman Regional Water Authority.

Authors' contribution

Farzaneh Dehghani Ghanatghestani: Conceptualization, software/statistical analysis, writing original draft, writing final draft; **Saeed Akbari Fard:** Supervision, writing review and editing, research methodology; **Atefeh Jafarpour:** Consultation, writing review and editing, validation of results, writing final draft; **Mohammad Zounemat-Kermani:** Conceptualization, supervision, oversight, writing review and editing, statistical analysis, writing final draft.

*Corresponding Author, E-mail: Zounemat@uk.ac.ir

Citation: Dehghani Ghanatghestani, F., Akbari Fard, S., Jafarpour, A., & Zounemat-Kermani, M. (2026). Sensitivity and uncertainty analysis of hydrological parameters of Rafsanjan plain using the SWAT model. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 93- 110.

doi: 10.22098/mmws.2026.19072.1753

Received: 19 December 2025., Received in revised form: 29 January 2026, Accepted: 12 February 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 93-110.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی دشت رفسنجان با استفاده از مدل SWAT

فرزانه دهقانی قناتغستانی^۱، سعید اکبری فرد^۲، عاطفه جعفرپور^۳، محمد ذونعمت کرمانی^{۴*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۳ استادیار، بخش منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۴ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

دشت رفسنجان به عنوان یکی از مناطق مهم خشک ایران، طی دهه های اخیر با کاهش منابع آب تجدیدپذیر، افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات قابل توجه در رژیم هیدرولوژیکی مواجه بوده است. در این پژوهش، به منظور شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و برآورد مؤلفه های بیلان آب این دشت، از مدل نیمه توزیعی و فرآیندمحور SWAT استفاده شد. به منظور پیاده سازی این مدل از داده های مکانی شامل مدل رقمی ارتفاع، کاربری اراضی، نوع خاک و شیب، به همراه داده های اقلیمی روزانه شامل بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. حوضه پس از تفکیک به زیرحوضه ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، با استفاده از الگوریتم SUFI-2 در نرم افزار SWAT-CUP واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت شد. از جمله مهم ترین محدودیت های این مدل می توان به کاهش دقت نتایج در بازه های زمانی طولانی مدت نسبت به دوره های کوتاه، عدم پیوستگی مکانی واحدهای پاسخ هیدرولوژیک و وابستگی شدید به کیفیت داده های ورودی اشاره کرد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و پارامترهای مرتبط با جریان پایه بیش ترین تأثیر را بر شبیه سازی جریان دارند. ارزیابی عملکرد مدل بیان گر تطابق قابل قبول بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی بود، به گونه ای که مقادیر شاخص های P-factor و R-factor در مراحل واسنجی به ترتیب ۰/۴۲ و ۲/۶۲ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۳۹ به دست آمد که در محدوده قابل قبول قرار گرفت. نتایج بیلان آب نشان داد که بیش از ۶۰ درصد بارش سالانه به صورت تبخیر و تعرق از حوضه خارج شده و سهم برگاب کم تر از ۰/۱ درصد است. به طور کلی، نتایج این پژوهش بیان گر توانایی مناسب مدل SWAT در بازنمایی رفتار هیدرولوژیکی دشت رفسنجان و کاربرد آن در مدیریت منابع آب و تحلیل اثرات تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه خشک است.

واژه های کلیدی: مدل سازی هیدرولوژیکی، مناطق خشک، بیلان آب، استان کرمان

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Zounemat@uk.ac.ir

استناد: دهقانی قناتغستانی، فرزانه، اکبری فرد، سعید، جعفرپور، عاطفه و ذونعمت کرمانی، محمد (۱۴۰۵). تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی دشت رفسنجان با استفاده از مدل SWAT. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۹۳-۱۱۰.

doi: 10.22098/mmws.2026.19072.1753

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۹۳ تا ۱۱۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱-مقدمه

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک کشور، به ویژه در حوضه‌هایی مانند دشت رفسنجان، رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و در نتیجه افزایش برداشت از منابع آب، فشار قابل توجهی بر کمیت و کیفیت منابع آبی ایجاد شده است (Hosseiniinia and Hassanzadeh, 2023, Bockstiegel et al. 2024). کاهش میزان آب‌های قابل بهره‌برداری و نیز افزایش پدیده شور شدن آب‌های زیرزمینی، هم‌اکنون یکی از چالش‌های اساسی مدیریت منابع آب در این منطقه به‌شمار می‌آید (Noori et al. 2021). در چنین شرایطی، بهره‌گیری از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و بررسی تعاملات آب سطحی و زیرزمینی، ابزاری مؤثر برای تحلیل وضعیت موجود و برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری پایدار از منابع آب قلمداد می‌شود (Hussainzad and Lee, 2021, Lyu et al. 2025).

در حوضه هیدرولوژی، مدل‌های متفاوتی با قابلیت‌های مختلف مانند رویکردهای توزیعی یا نیمه‌توزیعی، برای مدیریت و توسعه حوضه و ارزیابی منابع آب به کار می‌روند (Veetil et al. 2021; Sarker et al. 2025; Keller et al. 2023). این مدل‌ها معمولاً با دو هدف اصلی طراحی می‌شوند: نخست، درک دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت از رفتار پدیده‌های هیدرولوژیکی و اثرات متقابل آن‌ها؛ دوم، شبیه‌سازی کمی و کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی به منظور پیش‌بینی رواناب، کنترل سیل و خشکسالی و در کل برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه منابع آب (Zhang, 2025). در این میان، یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل ارزیابی آب و خاک^۱ است که به صورت نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی طراحی شده و برای شبیه‌سازی بلندمدت تأثیر تغییرات کاربری اراضی، عملیات کشاورزی و تغییرات اقلیمی بر بیلان آب، رسوب و کیفیت آب در حوضه‌های آبریز نسبتاً بزرگ کاربرد دارد (Kessete et al. 2019; Janic and Tadic, 2023; Lyu et al. 2025).

این مدل با یکپارچه‌سازی با محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، امکان پردازش خودکار داده‌های مکانی مانند نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاع را فراهم می‌آورد (López-Ballesteros et al. 2024). در SWAT تمام اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، نفوذ، تغذیه آب زیرزمینی، جریان پایه و جریان رودخانه‌ای در نظر گرفته می‌شوند (Zhang, 2025). بدین ترتیب، روش محاسبه رواناب

سطحی عمدتاً بر مبنای شماره منحنی^۲ و تبخیر و تعرق بر اساس معادله Penman-Monteith یا روش‌های تجربی دیگر انجام می‌شود. علاوه بر این، SWAT قادر است اثرات مدیریتی نظیر تغییر الگوی کشت، عملیات خاک‌ورزی، کوددهی و نصب سازه‌های کنترل فرسایش را بر کمیت و کیفیت آب ارزیابی کند (Aouissi et al. 2016; Janic and Tadic, 2023). بررسی‌های اخیر حاکی از آن است که مدل SWAT، با تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی مناسب، ابزار کارآمدی برای تحلیل جامع روابط بین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیک فراهم می‌کند (Koltsida et al. 2023; Rasheed et al. 2024 Taia et al. 2023).

در پژوهشی که به بررسی توانمندی مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در یک منطقه بسیار خشک (Hyper-Arid) در عربستان سعودی پرداخته است؛ نشان داده شد که علی‌رغم محدودیت داده‌های هیدرولوژیکی و شدت بالای تبخیر و تعرق در اقلیم‌های خشک، مدل SWAT قادر است دینامیک رواناب سطحی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. نویسندگان تأکید کرده‌اند که در مناطق خشک و نیمه خشک، واسنجی دقیق پارامترهای مرتبط با نفوذ، رواناب و جریان پایه نقش کلیدی در بهبود عملکرد مدل دارد و SWAT می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیریت منابع آب در این اقلیم‌ها باشد (Hussain et al. 2024). در مطالعه‌ای که با به کارگیری مدل SWAT، تولید رسوب و پاسخ هیدرولوژیکی یک حوضه نیمه خشک در اتیوپی تحت شرایط اقلیمی فعلی و آینده شبیه‌سازی شد نشان داد که مدل SWAT توانایی مناسبی در بازنمایی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق نیمه خشک دارد، اما حساسیت بالایی نسبت به تغییرات بارش و کاربری اراضی از خود نشان می‌دهد. نتایج بیان گر آن است که در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، تغییرات کوچک اقلیمی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر رواناب و فرسایش داشته باشد و SWAT ابزاری کارآمد برای ارزیابی این اثرات در مقیاس حوضه محسوب می‌شود (Woldemariam et al. 2024). در یک مطالعه کاربردی در حوضه Merguellil واقع در مرکز تونس که از اقلیم نیمه خشک مدیترانه‌ای بهره می‌برد، مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و تحلیل حساسیت پارامترها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که با وجود پیچیدگی بالای ناهمگنی محیطی، SWAT قادر است پویایی رواناب سطحی و توزیع زمانی هیدرولوژیکی را در چنین حوضه‌هایی شبیه‌سازی کند و نتیجه‌های آماری رضایت بخشی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ارائه دهد (Gharnouki et al. 2024).

همچنین، یکی از نقاط قوت آن، قابلیت تحلیل اثرات تغییرات کاربری اراضی و اقلیمی بر منابع آب است. لیکن، مطالعات نشان داده‌اند که نیاز به داده‌های ورودی گسترده، حساسیت به کیفیت و تفکیک‌پذیری داده‌ها و کاهش عدم قطعیت‌ها از چالش‌های مهم استفاده از این مدل است (Lei et al. 2024; Cecconello et al. 2025).

شبیه‌سازی تلفیقی آب شور و شیرین در دشت رفسنجان با مدل SWAT کم‌تر مورد توجه پژوهش‌گران و تصمیم‌گیرندگان بخش آب قرار گرفته است. از دلایل محدود بودن این مطالعات در کنار تعدد ذی‌نفعان و تصمیم‌گیرندگان، به مشکلاتی از قبیل فقدان یا کمبود داده‌های طولانی مدت مورد نیاز و نیز پیچیدگی محاسباتی و اجرایی مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در مسائل منابع آب می‌توان اشاره کرد. از طرفی بررسی اثر برهم‌کنش منابع آب در محدوده مطالعاتی دشت رفسنجان با توجه به وضعیت کنونی آبخوان آن، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر بوده و کاربرد اصلی این پژوهش، استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی تلفیقی آب شور و شیرین دشت رفسنجان در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب منطقه می‌باشد. بنابراین، با توجه به سوابق موفق مدل SWAT و اهمیت آن در مدیریت منابع آب، هدف از این پژوهش شبیه‌سازی بیلان آبی دشت رفسنجان با استفاده از مدل SWAT و اعتبارسنجی مدل برای این حوزه است تا از این طریق کارایی مدل در شرایط خاص این منطقه ارزیابی شود.

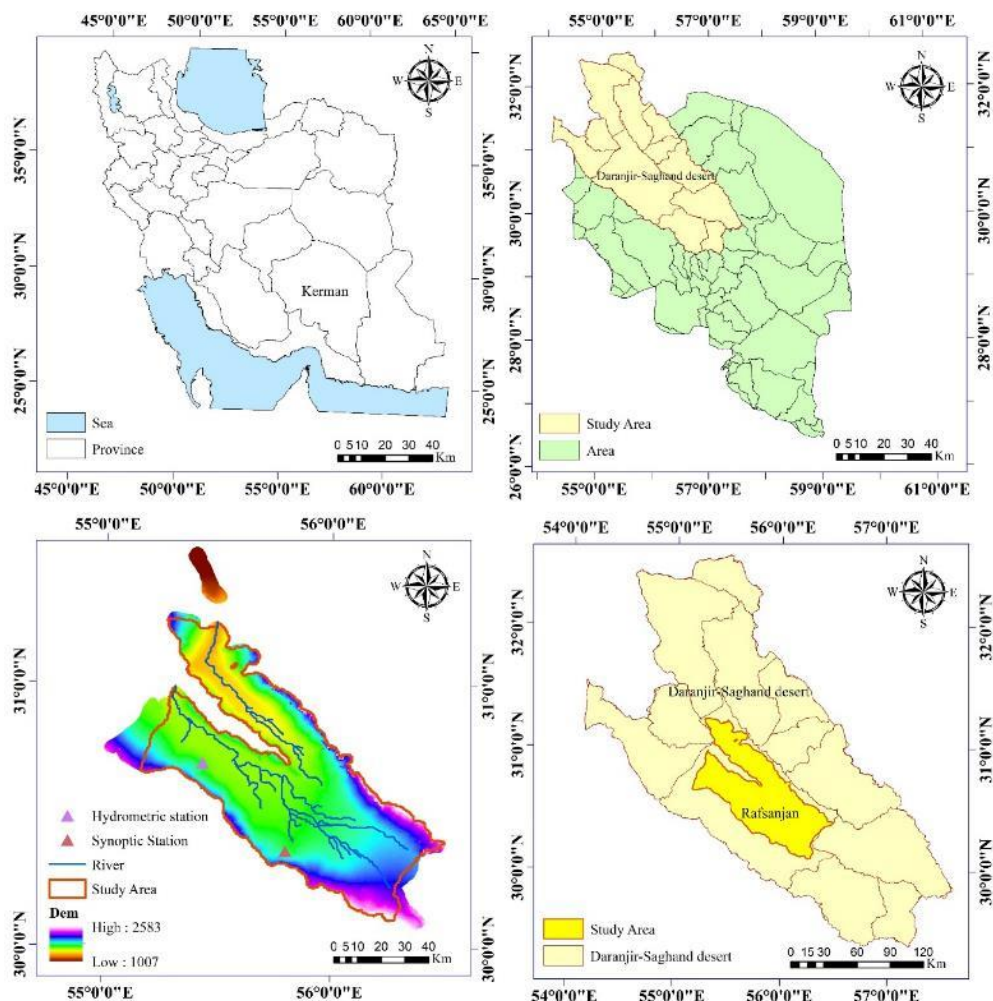
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

کویر درانجیر ساغند یک حوزه آبخیز درجه دو با مساحت ۵۰۷۳۷ کیلومترمربع در بخش مرکزی ایران است. این حوزه به ۱۲ زیرحوضه شامل رفسنجان، کویر درانجیر، کرمان باغین، بافق، زرنه، ارنان دهج، بردسیر، بهادران، کوهبنان، قریطولاراب، سیریز طغولجرد و ساغند تقسیم می‌شود. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

یک مطالعه، مدل SWAT به همراه ابزار واسنجی SWAT-CUP برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و تحلیل عدم قطعیت در حوضه زوشک-ابرده در استان خراسان رضوی، ایران به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل SWAT توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب در چنین مناطق کم‌آب دارد، هرچند عملکرد آن تحت محدودیت‌های آماری داده‌های هیدرولوژیکی کاهش می‌یابد، که ضرورت بهبود داده‌های مشاهداتی را در مطالعات حوضه‌های خشک ایران برجسته می‌کند (Khaleghi and Hosseini, 2024). با استفاده از مدل SWAT، اثر اقدامات حفاظت آب و خاک در یک حوضه نیمه‌خشک در تونس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که SWAT قادر است پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک را نسبت به سناریوهای مدیریتی مختلف شبیه‌سازی کند. این مطالعه تأکید می‌کند که مدل SWAT به‌ویژه در مناطق خشک، ابزاری مناسب برای ارزیابی راهکارهای کاهش رواناب، کنترل فرسایش و بهبود مدیریت منابع آب است، هر چند نیاز به واسنجی دقیق و داده‌های قابل اعتماد دارد (Hermassi et al. 2025).

مطالعه بررسی کاربرد مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در یک حوضه آزمایشی با ویژگی‌های کاربری اراضی مختلط (شهری/حاشیه‌ای شهری) با استفاده از مشاهدات بارندگی روزانه و ساعتی نشان داد که عملکرد مدل و تکنیک‌های گرافیکی در مقیاس روزانه عملکرد بهتری نسبت به مدل ساعتی دارد (Koltsida et al. 2023). ارزیابی فرآیندهای برف شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT نشان داد که شبیه‌سازی‌های دبی مدل SWAT طبق معیارهای آماری، رضایت‌بخش تا خوب بوده است و این مدل توانسته است منطقه پوشیده از برف را هنگام مقایسه با محصول پوشش برف روزانه MODIS به‌طور معقولی تخمین بزند (Taia et al. 2023). بررسی برای برجسته کردن عوامل مؤثر و مشخص کردن روندهای کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر ابزار ارزیابی خاک و آب حاکی از آن است که اگرچه وضوح داده‌های ورودی بر نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر SWAT به‌طور گسترده تعیین شده است، اما هنوز شکافی در ارائه چارچوب بررسی جامع برای شناسایی تأثیر وضوح و دقت داده‌ها وجود دارد (Rasheed et al. 2024).

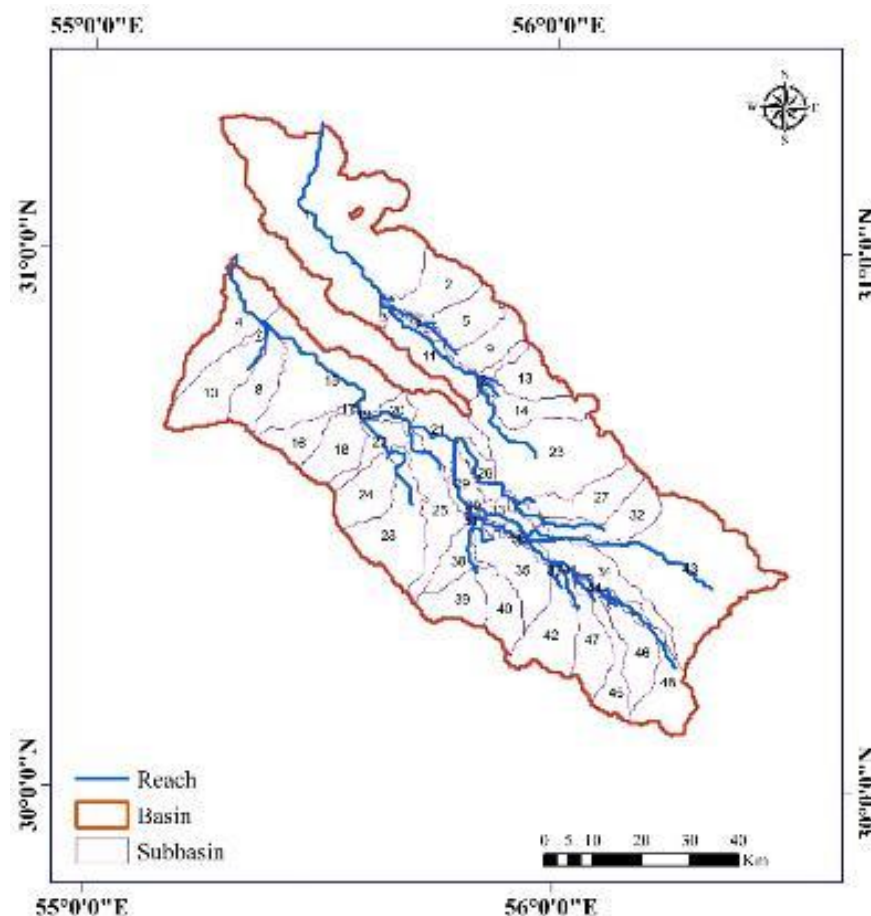


شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی حوزه آبخیز کویرهای درانجیر ساغند در ایران و استان کرمان
Figure 1- Location of the study area of the Daranjir-Saghand deserts watershed in Iran and Kerman province

۲-۲- مدل SWAT

مدل SWAT توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ در دراز مدت طراحی شده است (Zhang, 2025). مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی جامع و نیمه‌توزیعی است که برای شبیه‌سازی مقدار و کیفیت آب، نیز آثار کاربری اراضی، مدیریت کشاورزی و تغییرات اقلیمی در مقیاس حوزه آبریز توسعه یافته است (Fard et al. 2022). در شکل ۲ نقشه زیرحوضه‌های دشت رفسنجان ارائه شده است.

دشت رفسنجان که در شکل ۱ نمایش داده شده است، بزرگ‌ترین دشت با مساحت $12513/70$ کیلومترمربع در جنوب غربی حوضه کویر درانجیر ساغند است (حدود ۲۵ درصد حوضه را در بر می‌گیرد). محدوده مطالعاتی بین طول‌های جغرافیایی 52° تا 54° و 33° تا 56° شرقی و عرض‌های جغرافیایی 29° تا 31° شمالی واقع است و مساحت این آبخوان $4298/64$ کیلومترمربع است. در این میان، دشت رفسنجان از سه دشت اصلی به نام‌های رفسنجان، نوق و انار تشکیل شده است. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا 1469 متر است. ناحیه مرتفع کوهستانی در غرب (کوه‌های سرچشمه (کمر بند دهج- سردویه) و شرق (کوه‌های داوران) این دشت با شیب به سمت قسمت مرکزی دشت واقع شده است (Hosseiniinia and Hassanzadeh, 2023).



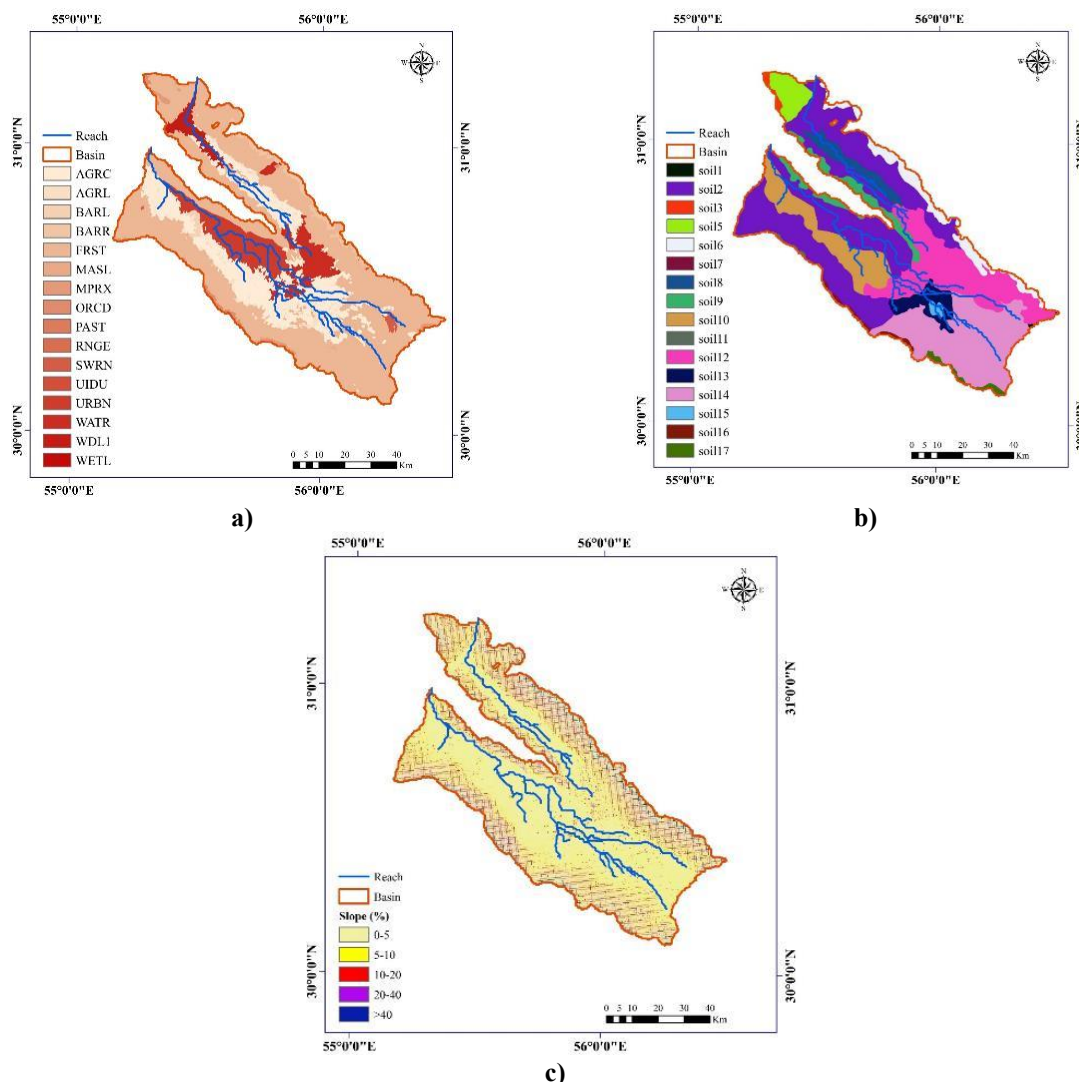
شکل ۲- زیرحوضه‌های دشت رفسنجان
Figure 2- Sub-basins of the Rafsanjan plain

دسترس بودن کد منبع باز، برخی از پژوهش‌گران ماژول‌های SWAT را برای انطباق با مطالعات خاص خود اصلاح و بهبود داده‌اند.

۲-۳- آماده‌سازی داده‌ها

ورودی‌های SWAT عبارتند از دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی، مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، نقشه پوشش زمین، نقشه نوع خاک، نقشه شیب و ورودی و خروجی آب از رودخانه (Hussainzada and Lee, 2021). در شکل ۳ نقشه کاربری اراضی، خاک و شیب منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

مدل SWAT حوزه‌های آبخیز را به زیرحوضه‌ها و سپس به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌کند که مناطقی با کاربری اراضی، خاک و شیب مشابه را نشان می‌دهند تا فرآیندهایی مانند رواناب، نفوذ، تبخیر و تعرق، جریان آب زیرزمینی و چرخه مواد مغذی را تحلیل کند (Veettil et al. 2021; Gasirabo et al. 2023). به‌طور کلی، این مدل برای پیش‌بینی پاسخ هیدرولوژیکی به اثرات اقلیمی و انسانی آینده (Li et al. 2021; Gwal et al. 2023)، ارزیابی مدیریت منابع آب و خاک (Wang et al. 2023) و تخمین تغذیه آب‌های زیرزمینی در دشت‌ها (Awan et al. 2014) اعمال می‌شود. با توجه به در



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی (a)، خاک (b) و شیب (c) دشت رفسنجان
Figure 3 - Landuse (a), soil (b) and slope (c) map of the Rafsanjan plain

امکان شبیه سازی خودکار مدل استفاده گردید. دبی ثبت شده ماهانه برای ایستگاه شاهزاده عباس در محدوده مطالعاتی برای دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ نیز در دسترس بوده است و برای اهداف واسنجی و اعتبارسنجی استفاده شد.

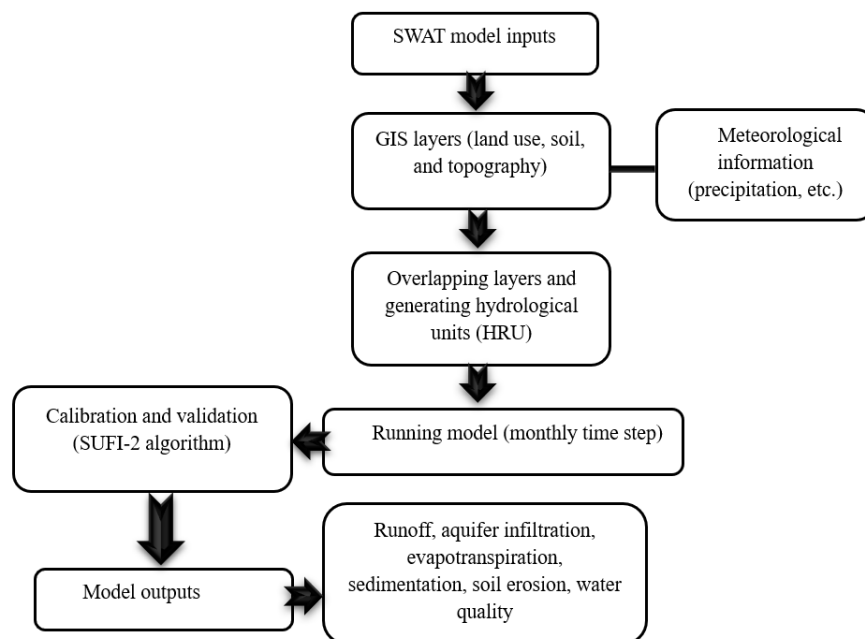
در مطالعه حاضر، مقادیر پارامترهای ایستگاههای هواشناسی برای دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ به مدل وارد شده و نتایج حاصل از شبیه سازی طی چند مرحله و گام به گام بازبینی و اصلاح شده و مدل در هر تکرار اجرا می شود تا میزان انطباق داده های شبیه سازی شده و داده های مشاهداتی افزایش یابد. بدین ترتیب، مقادیر پارامترهای مدل به تدریج به دامنه بهینه خود نزدیک شده و کارایی مدل در شبیه سازی شرایط حوضه بهبود می یابد.

بدین منظور، در آغاز فرآیند مدل سازی، نقشه مدل رقومی ارتفاع به همراه شبکه آبراهه های اصلی حوضه وارد محیط نرم افزار SWAT شدند. پس از آن، با بهره گیری از نقشه های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، محدوده های همگن از نظر ویژگی های هیدرولوژیکی تعیین و به صورت واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شدند. این مرحله پایه ای ترین گام در آماده سازی داده های ورودی مدل محسوب می شود. همچنین، داده های ثبت شده روزانه دماهای حداکثر و حداقل و بارندگی از ایستگاه سینوپتیک رفسنجان از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ به عنوان داده های ورودی آب و هوا برای راه اندازی مدل SWAT در مقیاس زمانی روزانه استفاده شدند. به دلیل عدم کفایت و در دسترس نبودن اطلاعات متغیرهای تابش خورشیدی، متوسط سرعت باد و رطوبت نسبی در مقیاس روزانه، از

که در آن، SW_t ، مقدار نهایی آب در خاک در روز i ام (میلی‌متر)، SW_0 ، مقدار اولیه آب در خاک در روز i ام (میلی‌متر)، R_{day}^0 مقدار بارندگی در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} ، مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a ، مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} ، مقدار آبی که به پروفیل خاک (منطقه غیراشباع خاک) در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر)، Q_{gw} ، مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر) است (Zaree Garizi et al. 2016). به عبارتی، فرآیند هیدرولوژیکی درگیر در پژوهش حاضر با استفاده از معادله بیلان آب، شامل فرآیندهایی مانند رواناب سطحی، نفوذ، انتقال آب خاک، تبخیر و تعرق، جریان آب زیرزمینی و سهم حوضچه‌ها محاسبه می‌شود (Zhang, 2025). در شکل ۴ نمودار جریان‌یابی مراحل مدل‌سازی با SWAT ارائه شده است.

در مدل SWAT، رواناب سطحی حاصل از بارندگی روزانه با استفاده از روش شماره منحنی SCS اصلاح‌شده تخمین زده می‌شود که میزان رواناب را براساس کاربری اراضی محلی، نوع خاک و شرایط رطوبتی پیشین تخمین می‌زند. در مقایسه با شماره منحنی در مدل استاندارد تلفات SCS، شماره منحنی در SWAT یک پارامتر ایستا نیست، بلکه یک متغیر حالت پویا است. کاربر فقط باید یک مقدار اولیه CN ارائه دهد. با پیشرفت مدل، شماره منحنی در SWAT ممکن است با گذشت زمان تغییر کند و منعکس‌کننده شرایط متغیر حوزه آبخیز باشد (Zhang, 2025). چرخه هیدرولوژیکی در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است که در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day}^0 - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$



شکل ۴- نمودار شبیه‌سازی جریان با مدل SWAT

Figure 4 – Flow simulation diagram using the SWAT model

۲-۴- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

واسنجی و اعتبارسنجی در مدل‌های توزیعی و فیزیکی پایه‌ای مانند SWAT از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این مدل‌ها به دلیل ساختار پیچیده، تعداد زیاد پارامترها و حساسیت بالا نسبت به داده‌های ورودی، مستعد بروز خطا و عدم قطعیت هستند (Moriasi et al. 2007). بخش قابل توجهی از این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از کمبود داده‌های مشاهداتی، خطاهای اندازه‌گیری و یا تخمین

نادرست پارامترهای مفهومی مدل باشد (Rezaei Moghaddam et al. 2021). بنابراین، هدف از فرآیند واسنجی، تعیین مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه است که بیش‌ترین تطابق را میان خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی فراهم کند و عملکرد مدل را بهینه سازد (Zumwald et al. 2020).

در این پژوهش، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و به‌کارگیری الگوریتم SUFI-2 انجام شد

جامع عملکرد مدل از شاخص های آماری دیگری مثل ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین وزنی (bR^2)، نش-ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. ضریب تعیین، میزان همبستگی میان داده های شبیه سازی شده و مشاهداتی را نشان می دهد و مقادیر آن بین ۰ و ۱ متغیر است (Fard et al. 2022). به منظور انجام فرآیند Warm up از داده های دبی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری سال های ۲۰۰۴-۲۰۰۲، در فرآیند واسنجی از داده های سال های ۲۰۲۴-۲۰۰۴ و در اعتبارسنجی داده های سال های ۲۰۲۴-۲۰۲۲ استفاده شد و خروجی های مدل با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج اجرای مدل SWAT در دشت رفسنجان که در جدول ۱ ارائه شده است نشان داد که این مدل با توجه به محدودیت های داده ای در مناطق خشک، توانایی مطلوبی در شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه دارد.

(Fard et al. 2022). نرم افزار SWAT-CUP که توسط مؤسسه تحقیقات و علوم دریایی سوئیس توسعه یافته است، ابزاری کارآمد برای واسنجی، تحلیل حساسیت، صحت سنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT به شمار می آید. این نرم افزار ضمن پشتیبانی از الگوریتم های مختلفی نظیر Parasol، GLUE، PSO، SUFI2 و MCMC، امکان اجرای مدل سازی معکوس و تعیین پارامترهای بهینه را فراهم می کند (Arnold et al. 2012; Fathollahnejad, 2025). الگوریتم SUFI-2 به عنوان یکی از پرکاربردترین روش ها در واسنجی مدل SWAT، چارچوبی نیمه خودکار ارائه می دهد که در آن عدم قطعیت ورودی ها و پارامترهای مدل با محاسبه دو شاخص اصلی P-factor و R-factor ارزیابی می شود (Mitova et al. 2024).

مقادیر P-factor در بازه ۰ تا ۱ و مقادیر R-factor در بازه ۰ تا بی نهایت قرار دارند. در حالت ایده آل، مقدار $P\text{-factor} = 1$ و $R\text{-factor} = 1$ بیانگر انطباق کامل مقادیر پیش بینی شده و مشاهداتی است. فاصله گرفتن این مقادیر از شرایط ایده آل نشان دهنده افزایش عدم قطعیت و کاهش دقت شبیه سازی است (Khaleghi and Hosseini, 2024). علاوه بر شاخص های مذکور، برای ارزیابی

جدول ۱- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی مدل و دامنه بهینه مقادیر در دشت رفسنجان

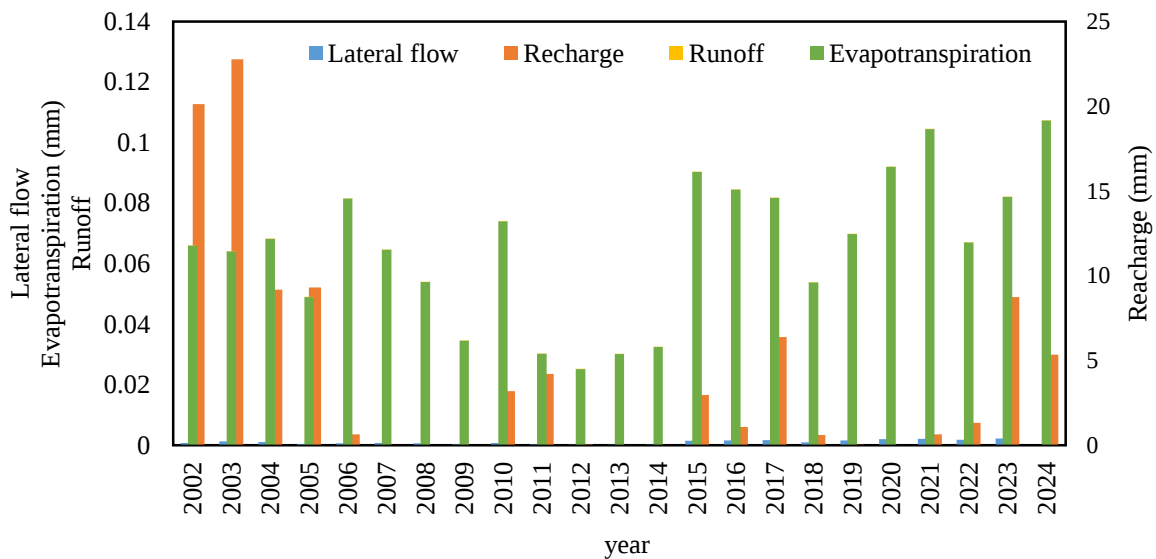
Table 1 - Results of sensitivity analysis of key model parameters and optimal range of values in Rafsanjan plain

row	Parameter name	Par-Name	T-test	P-value	Min	Max	Optimal range
1	Manning's n	CH N2	-2.051	0.043	-0.016	-0.014	-0.015
2	Snow melt base temperature	SMTMP	1.892	0.062	15.000	20.000	17.075
3	Snowfall temperature	SFTMP	1.765	0.081	9.000	13.000	12.500
4	Soil hydraulic conductivity	SOL K	-1.745	0.085	105.000	120.000	116.324
5	Muskingum weighting factor	MSK X	-1.366	0.176	0.020	0.029	0.020
6	Minimum depth to water in a shallow aquifer	SOL BD	-1.357	0.178	2.000	2.500	2.042
7	Snow melt coefficient	SMFMN	1.113	0.269	12.000	16.000	15.980
8	Lateral flow	CANMX	1.052	0.296	53.000	57.000	53.340
9	Channel routing coefficient	MSK CO2	0.930	0.355	5.500	6.000	5.917
10	Threshold depth for a deep aquifer	GWQMN	-0.852	0.396	4600.000	4700.000	4679.500
11	Groundwater re-evaporation coefficient	GW REVAP	-0.836	0.405	0.150	0.200	0.159
12	Deep aquifer recharge	RCHRG DP	-0.822	0.413	0.700	0.900	0.771
13	Snow pack temperature lag	TIMP	0.754	0.453	0.500	0.700	0.583
14	Average slope length of the sub-basin	SLSUBBSN	0.706	0.481	128.000	134.000	133.070
15	Soil available water capacity	SOL AWC	0.620	0.536	0.490	0.510	0.497
16	Surface runoff lag factor	SURLAG	-0.599	0.550	4.000	6.000	5.650
17	Surface roughness / Manning's n	OV N	0.572	0.568	21.000	25.000	24.340
18	Snow melt coefficient in summer	SMFMX	0.545	0.587	7.000	11.000	9.100
19	Curve number	CN2	0.503	0.616	65.000	70.000	68.275
20	Baseflow alpha factor	ALPHA BF	-0.432	0.666	0.150	0.160	0.154
21	Soil albedo	SOL ALB	0.392	0.696	0.100	0.120	0.114
22	Plant uptake compensation factor	EPCO	-0.255	0.799	0.250	0.300	0.262
23	Delay time for lateral flow to a shallow aquifer	REVAPMN	0.231	0.817	290.000	300.000	290.850
24	Soil evaporation compensation factor	ESCO	-0.118	0.905	0.200	0.280	0.225
25	Channel hydraulic conductivity	CH K2	0.086	0.931	270.000	280.000	277.490
26	Channel routing coefficient	MSK CO1	-0.055	0.956	2.000	2.250	2.163
27	Shallow aquifer evaporation coefficient	GW DELAY	0.054	0.956	135.000	145.000	139.350

نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. همچنین، نتایج نشان داد که مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی‌های پایه عملکرد بهتری نسبت به دبی‌های اوج دارد، به‌طوری‌که این الگو در دشت رفسنجان نیز به‌طور واضح مشاهده شد. این نتیجه براساس تحلیل هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده و بررسی نمودار پراکنش دبی به‌دست آمد. مشابه پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه‌های خشک ایران، شبیه‌سازی دبی‌های اوج با مشکلاتی مواجه است که به‌دلیل محدودیت داده‌های بارش با تفکیک زمانی بالا است (Fathollahnejad Damghani et al. 2025).

از طرفی، تحلیل‌های مشابه در این زمینه نشان داده‌اند که مدل SWAT در شبیه‌سازی الگوهای بارشی و تغذیه سطحی عملکرد خوبی دارد (Zaree Garizi et al. 2016; Ruan et al. 2017). در شکل ۵ روند پارامترهای تغذیه، رواناب، برگاب و تبخیر و تعرق در طول دوره آماری آورده شده است.

طبق تحلیل حساسیت انجام‌شده، ۲۷ پارامتر مؤثر بر رواناب، جریان پایه و رفتار آب زیرزمینی شناسایی و با استفاده از الگوریتم-SUFI 2 بهینه‌سازی شدند. اعمال مقادیر بهینه این پارامترها منجر به بهبود قابل‌توجه عملکرد مدل شد. در مرحله واسنجی، مقادیر $P=0.42$ و $R\text{-factor}=0.62$ و در مرحله اعتبارسنجی، $P\text{-factor}=0.42$ و $R\text{-factor}=0.39$ نشان‌دهنده تطابق رضایت‌بخش بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بود که در جهت بهبود آن می‌توان از داده‌های بارش ماهواره‌ای بهره گرفت. لازم به ذکر است، مدل قابلیت اعمال مدیریت انسانی را ندارد و برای دقت بیشتر، می‌توان از روش‌های coupling با مدل‌های جریان آب زیرزمینی یا افزودن عملیات-pumping/auto-irrigation بهره گرفت. در مطالعات مختلف، از جمله پژوهش‌های (Rezaei Moghaddam et al. 2021) و همچنین، (Zahedi et al. 2023)، مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و تغییرات دبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکرد مناسبی داشته است که با

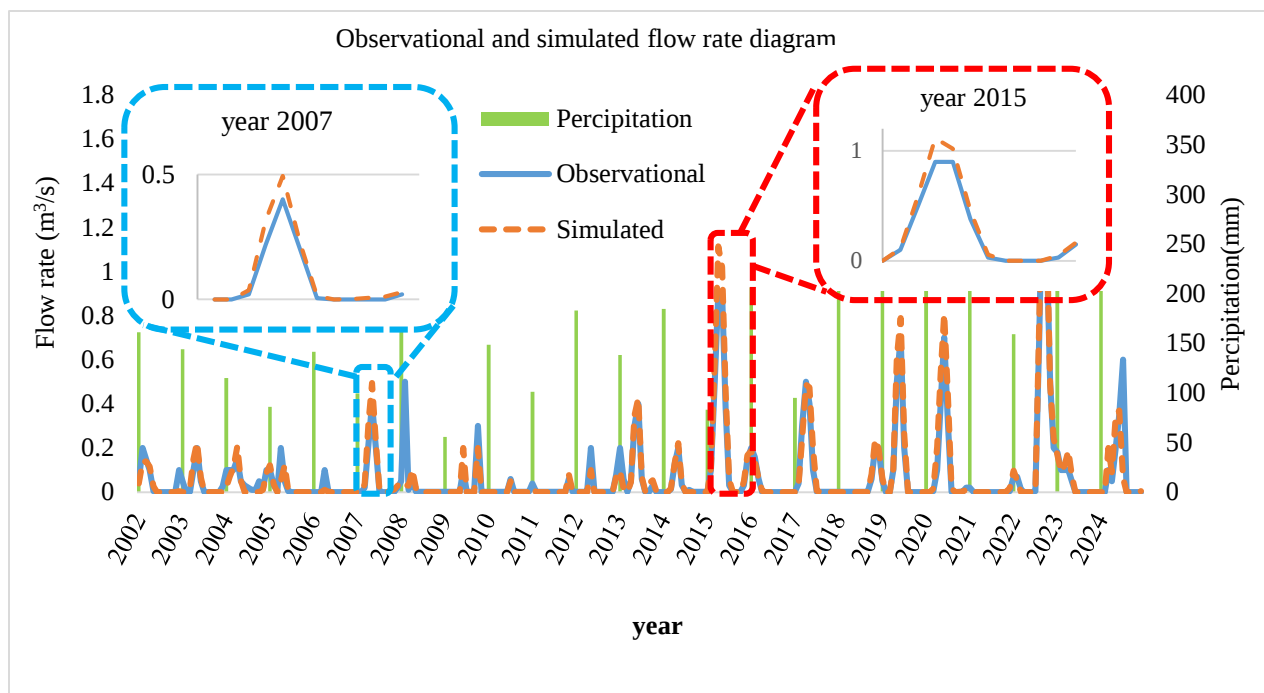


شکل ۵- روند میانگین سالانه پارامترهای تغذیه، رواناب، برگاب و تبخیر و تعرق در طول دوره آماری

Figure 5 - Annual average trends in recharge, runoff, lateral flow, and evapotranspiration parameters during the statistical period

(Fard et al. 2022) هم‌راستا است که نشان می‌دهند تبخیر و تعرق به‌عنوان عامل اصلی اتلاف آب در این مناطق شناخته می‌شود. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۶ ارائه شده است.

این نتایج مشابه با یافته‌های پژوهش‌های قبلی است که بیان می‌کنند در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، بیش از ۶۰ درصد بارش به تبخیر و تعرق اختصاص می‌یابد و سهم برگاب بسیار کم است (Aouissi et al., 2016; Gwal et al., 2023). این یافته‌ها با مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های مختلف کشور، از جمله مطالعات



شکل ۶- سری زمانی دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار SWAT (مناطق بیش شبیه‌سازی شده در دبی‌های یک سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵)

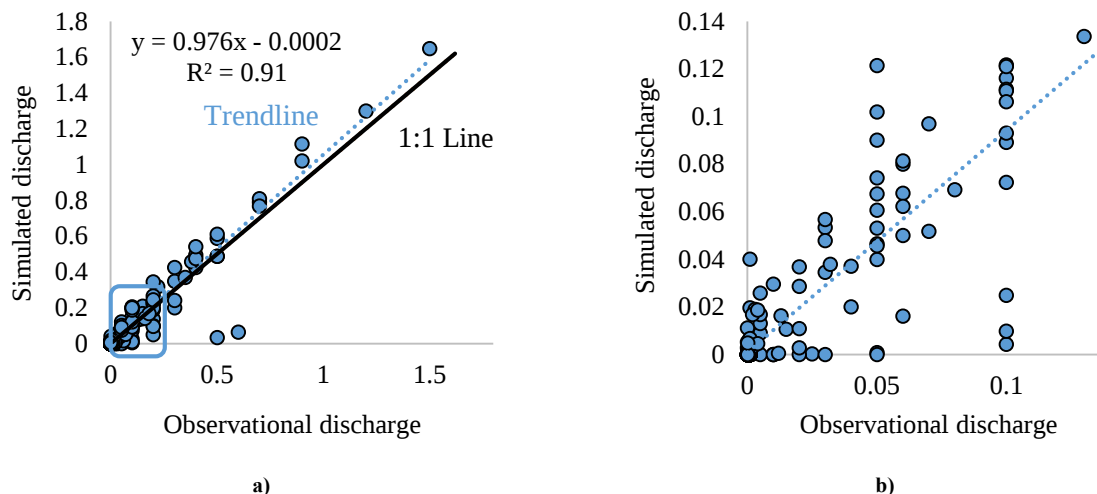
Figure 6 - Time series of observed discharge and discharge simulated with SWAT software (over-simulated areas are identified in peak discharge years 2007 and 2015)

دقیق بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت و نبود داده‌های ساعتی بارندگی که منجر به عدم بازتولید مناسب پیک‌های رواناب می‌شوند. علاوه بر این، حساسیت بالای مدل به پارامترهایی نظیر شماره منحنی (CN2) و هدایت هیدرولیکی خاک (SOL_K) نیز می‌تواند باعث بیش‌برآورد دبی‌های اوج شود؛ CN2 مشخص می‌کند چه درصدی از بارش به رواناب سطحی تبدیل می‌شود، به‌طوری‌که افزایش آن موجب افزایش دبی اوج می‌گردد و SOL_K توانایی خاک در نفوذ آب را تعیین می‌کند، به‌گونه‌ای که کاهش این مقدار باعث افزایش رواناب سطحی و در نتیجه بیش‌برآورد دبی‌های اوج می‌شود. با این حال، در مقادیر پایین و متوسط دبی، مدل عملکرد مناسبی دارد و توانسته است روند کلی تغییرات دبی را به‌خوبی بازتولید کند، که نشان‌دهنده قابلیت SWAT در شبیه‌سازی جریان پایه و مدیریت منابع آب پایدار است. این یافته‌ها بیان‌گر آن است که هر چند SWAT برای شبیه‌سازی رواناب‌های پایه مناسب است، اما در بازتولید دبی‌های اوج تندابی به‌دلیل محدودیت داده‌های ورودی دچار چالش می‌شود.

نمودار پراکنش دبی مشاهداتی در برابر دبی شبیه‌سازی شده شکل ۷ ارائه شده است.

این شکل سری زمانی دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAT را برای دوره آماری ۲۰۰۲-۲۰۲۴ به‌صورت ماهانه نشان می‌دهد. مقایسه دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل SWAT توانایی خوبی در شبیه‌سازی تغییرات فصلی دبی دارد، به‌گونه‌ای که تغییرات دبی در ماه‌های آبان تا اردیبهشت با بارش هم‌زمان است. این الگو در پژوهش‌های مختلف همچون (Hosseiniinia and Hassanzadeh, 2023; Taia et al., 2023) تأکید شده است که بارش‌های پاییز و زمستان در حوضه‌های خشک بدون برف‌گیری گسترده، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده رژیم جریان هستند. همچنین، در این نمودار مشاهده می‌شود که بیش‌ترین بارش در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و کم‌ترین در سال آبی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ ثبت شده است.

با این حال، شکل ۶ نشان می‌دهد که مدل در مقاطع زمانی دارای پیک رواناب، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵ که در شکل به‌صورت نواحی بیش‌برآورد مشخص شده‌اند، دبی‌های اوج را بیش‌برآورد کرده است؛ به این معنا که مقادیر شبیه‌سازی شده بزرگ‌تر از دبی‌های مشاهداتی است. این رفتار معمولاً ناشی از محدودیت‌های داده‌ای و ساختاری مدل است؛ به‌ویژه عدم نمایش



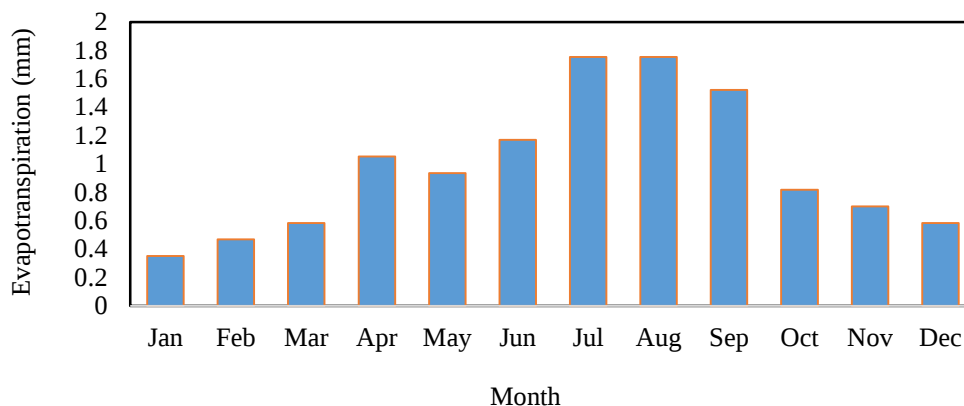
شکل ۷- نمودار پراکنش دبی مشاهداتی در برابر دبی شبیه‌سازی شده (a)، در شکل سمت راست (b)، نمودار پراکنش دبی‌های کم‌تر از ۰/۱۵ مترمکعب بر ثانیه

Figure 7- Scatter plot of observed discharge versus simulated discharge. The figure on the right shows the scatter plot of discharges less than 0.15 m³/s.

نیز استفاده از داده‌های بارش با تفکیک مکانی بالاتر، کارایی مدل را در شبیه‌سازی دبی‌های اوج ارتقا داد. در همین راستا، کم‌برآوردی دبی‌های اوج در برخی از دوره‌ها، که در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده مشاهده شده است. بر خلاف نتایج این پژوهش، در مطالعه Mitova et al. (2024) و همچنین Awan and Ismaeel, (2014) اشاره شده است که مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب‌های شدید و تندآبی دچار کم‌برآوردی می‌شود.

تحلیل تغییرات زمانی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نشان داد که بارش، رواناب سطحی، جریان جانبی و رطوبت خاک از ماه مهر روند افزایشی پیدا کرده و در ماه فروردین به اوج خود می‌رسند. پس از آن، در ماه خرداد کاهش محسوسی مشاهده می‌شود. در مقابل، جریان پایه تغییرات آرام‌تری در طول سال دارد و بیش‌ترین مقدار آن در ماه فروردین، هم‌زمان با آغاز ذوب برف، مشاهده می‌شود. در ماه‌های خشک (خرداد تا شهریور)، جریان پایه منبع اصلی تأمین آب رودخانه است. به‌منظور بررسی تبخیر و تعرق، میانگین ماهانه مقادیر تبخیر و تعرق در شکل ۸ ارائه شده است.

این نمودار نشان می‌دهد که مدل SWAT از توانایی مطلوبی در بازتولید روند تغییرات جریان برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که مقدار ضریب تعیین ($R^2 \approx 0.91$) بیان‌گر همبستگی قوی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. با این حال، مقایسه نقاط نسبت به خط ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل در مقادیر دبی پایین و متوسط عملکرد مناسبی داشته، ولی در مقاطع زمانی دارای پیک رواناب دچار بیش‌برآورد شده است؛ به این معنی که دبی‌های اوج مشاهداتی به‌درستی توسط مدل شبیه‌سازی نشده و بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شده‌اند. این رفتار معمولاً ناشی از عدم نمایش دقیق بارش‌های حدی، نبود داده‌های ساعتی بارندگی و حساسیت زیاد مدل به پارامترهایی نظیر شماره منحنی و هدایت هیدرولیکی خاک است. در برخی زمان‌ها نیز بیش‌برآورد جریان سطحی مشاهده می‌شود که می‌تواند از تخمین بیش‌ازحد رواناب ناشی از شرایط رطوبتی خاک یا عدم لحاظ دقیق اثرات نفوذ و جریان‌های جانبی باشد. در مجموع، نتایج نمودار نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از خطای مدل در بازتولید رخدادهای تندآبی متمرکز است و می‌توان با بهبود تخمین پارامترهای مرتبط با نفوذ و فرآیندهای سطحی و



شکل ۸- میانگین ماهانه تبخیر و تعرق
Figure 8 - Monthly average of evapotranspiration

جریان پایه، دامنه تغییرات وسیعی را در فضای پارامتری به خود اختصاص داده و نقش تعیین کننده‌ای در پهنای باند عدم قطعیت خروجی مدل ایفا کردند. این موضوع بیانگر حساسیت بالای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط رطوبتی اولیه است، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تغییرات کوچک در این پارامترها می‌تواند منجر به نوسانات قابل توجه در جریان شبیه‌سازی شده شود. همچنین، مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌های R و P -factor نشان می‌دهد که اگرچه مدل توانسته است بخش قابل قبولی از داده‌های مشاهداتی را در بازه عدم قطعیت پوشش دهد، اما همچنان بخشی از عدم قطعیت به محدودیت‌های داده‌ای، ساده‌سازی فرآیندهای فیزیکی و ناهمگنی مکانی پارامترها بازمی‌گردد. همچنین، مقدار بالای $R=2/62$ در مرحله واسنجی نشان‌دهنده پهنای زیاد نوار عدم قطعیت شبیه‌سازی است که عمدتاً ناشی از دامنه وسیع پارامترهای واسنجی، ضعف مدل در بازنمایی رخدادهای حدی دبی و وجود عدم قطعیت قابل توجه در داده‌های ورودی به‌ویژه بارش می‌باشد. این موضوع بیانگر آن است که مدل برای پوشش بخشی از داده‌های مشاهداتی ناچار به افزایش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها شده است. از این‌رو، نتایج این مطالعه بر اهمیت در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی در تفسیر خروجی‌های مدل و استفاده از آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تأکید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف برآورد مؤلفه‌های بیابان آب و تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولوژیکی دشت رفسنجان، از مدل SWAT در بازه زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۲ استفاده شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسازی با

از نظر تبخیر و تعرق، بیش‌ترین مقدار پتانسیل آن در ماه‌های گرم (خرداد تا مرداد) و کم‌ترین مقدار در ماه‌های سرد (آبان تا بهمن) ثبت شد. تبخیر و تعرق واقعی که تحت تأثیر رطوبت خاک، دما و بارش است، بیش‌ترین مقدار را در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و کم‌ترین مقدار را در آبان و آذر نشان داد. در ماه‌های زمستان، با وجود بارش زیاد، به‌دلیل پایین بودن دما، مقدار تبخیر و تعرق واقعی پایین باقی مانده است. در مطالعات (Arnold et al., 2012; Khaleghi and Hosseini., 2024) نیز تأثیر هم‌زمان بارش، دما و رطوبت خاک بر رفتار حوضه گزارش شده است. همچنین، جریان پایه به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب در ماه‌های خشک، همان‌طور که در مطالعات (Gwal et al., 2023; Keller et al., 2023) آمده است، در این حوضه نیز مشاهده شد.

نتایج کلی این پژوهش (شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۱) نشان می‌دهد که مدل SWAT با وجود محدودیت‌های داده‌ای، کارایی مناسبی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در دشت رفسنجان دارد. این نتایج مطابق با یافته‌های سایر پژوهش‌گران در مناطق مشابه بوده و به‌طور مشابه توصیه می‌شود که از مدل SWAT برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی، تحلیل اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری زمین، و به‌ویژه در تحلیل‌های مرتبط با مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود (Moriasi et al., 2007; Gasirabo et al. 2023).

نتایج تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیکی نشان داد که بخش قابل توجهی از عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی جریان ناشی از پارامترهایی است که مستقیماً با فرآیندهای تولید رواناب، نفوذ و جریان پایه مرتبط هستند. پارامترهایی نظیر شماره منحنی (CN2)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL_K) و پارامترهای کنترل‌کننده

مکانی بالاتر و بهبود تخمین پارامترهای مرتبط با نفوذ و فرآیندهای سطحی توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان بابت تهیه و در دسترس قرار دادن داده‌های مرتبط، کمال تشکر را دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله هیچگونه تضاد منافی در رابطه با تألیف یا انتشار این مقاله اعلام نمی‌کنند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌ها بنا به درخواست معقول نویسنده مسئول، منوط به رعایت سیاست‌های اشتراک‌گذاری داده‌های سازمانی و مجوزهای سازمان آب منطقه‌ای کرمان، می‌تواند در دسترس قرار بگیرد.

مشارکت نویسندگان

فرزانه دهقانی قناتغستانی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آمار، نگارش نسخه اولیه مقاله، نگارش نسخه نهایی مقاله؛
سعید اکبری فرد: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، روش‌شناسی پژوهش؛ **عاطفه جعفر پور:** مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج، نگارش نسخه نهایی مقاله؛ **محمد ذونعمت کرمانی:** مفهوم‌سازی، راهنمایی، نظارت، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری، نگارش نسخه نهایی مقاله.

منابع:

رضائی مقدم، محمد حسین، مختاری، داود و شفیع مهر، مجید (۱۴۰۰).
واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب
در حوضه آبریز شهر چای میانه. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۵(۷۶):
۱۳۹-۱۲۹.

doi:10.22034/gp.2020.40775.2656

زارع گاریزی، آرش و طالبی، علی (۱۳۹۵). شبیه‌سازی بیلان آب حوضه
آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه قره‌سو استان
گلستان). *مهندسی منابع آب*، ۹(۳۰)، ۳۷-۵۰.

www.civilica.com/doc/1912896

زاهدی، احسان، طالبی، علی، داوری، کامران و موسوی، وحید (۱۴۰۲).
شبیه‌سازی و پهنه‌بندی تبخیر و تعرق حوزه در بند سملقان با استفاده
از مدل SWAT و روش زمین آمار. *علوم و مهندسی آبخیزداری/ایران*،
۱۷(۶۱)، ۲۹-۲۱.

jwmsei.ir/article-1-1133-fa.html

الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP نشان داد که مدل علی‌رغم محدودیت‌های داده‌ای موجود، عملکردی مناسب در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی این منطقه خشک از خود داشته است. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های و پوشش مناسب آماری نشان‌دهنده همبستگی قوی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده است که بیان‌گر تطابق قابل قبول مدل با شرایط عدم قطعیت خاص حوضه است.

تحلیل حساسیت پارامتری ۲۷ پارامتر کلیدی را شناسایی کرد که در میان آن‌ها شماره منحنی (CN2)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL_K) و پارامترهای کنترل‌کننده جریان پایه (ALPHA_BF، GW_DELAY و GWQMN) بیش‌ترین تأثیر را بر خروجی‌های مدل داشتند. این یافته‌ها تأکید می‌کند که دقت در تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک و شرایط رطوبتی اولیه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌ها دارد.

نتایج بیلان آب حوضه نشان داد که بیش از ۶۰ درصد بارش سالانه به‌صورت تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود و سهم برگاب (return flow) کمتر از ۰/۱ درصد است، که الگوی متداول در مناطق خشک ایران محسوب می‌شود. مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی تغییرات فصلی دبی نشان داد، به‌گونه‌ای که جریان‌های پایه در ماه‌های خشک (خرداد تا شهریور) به‌خوبی بازتولید شدند. با این حال، در مقاطع زمانی دارای پیک رواناب (به‌ویژه در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵) دچار بیش‌برآورد شد، که ناشی از محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی به داده‌های ساعتی بارندگی، عدم نمایش دقیق بارش‌های حدی و حساسیت بالای مدل به پارامترهای مرتبط با رواناب سطحی است. با توجه به اینکه رفسنجان مرکز کاشت پسته است و برداشت شدید آب زیرزمینی، عامل اصلی کاهش ذخیره است لذا عدم لحاظ نمایندگی مدیریت انسانی (آبیاری/برداشت) یکی از محدودیت‌های مهم مدل است. پیشنهاد می‌شود از مدل جریان آب زیرزمینی یا افزودن عملیات مدیریتی در مدل ارزیابی آب و خاک برای شبیه‌سازی دقیق‌تر استفاده گردد.

این خروجی‌ها می‌توانند در حوزه‌های مدیریتی متعددی از جمله بهینه‌سازی منابع آب شیرین و شور، تصمیم‌گیری درباره تغییرات الگوی کشت، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و مدیریت پایدار بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند. ادغام نتایج مدل با سناریوهای مختلف مدیریتی می‌تواند به توسعه راهکارهای مؤثر در مقابله با بحران کم‌آبی، جلوگیری از شورشدگی منابع آب زیرزمینی و ارزیابی پیامدهای برداشت بیش از حد آبخوان‌ها کمک شایانی کند. برای بهبود کارایی مدل در شبیه‌سازی دبی‌های اوج، استفاده از داده‌های بارش با تفکیک زمانی و

فرد، رضا، وفاخواه، مهدی و مرادی، حمیدرضا (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع در برآورد دبی روزانه حوزه آبخیز ارازکوسه با استفاده از مدل SWAT. علوم و مهندسی آبخیزداری / ایران، ۱۶ (۵۶): ۵۳-۶۲

doi:10.1001.1.20089554.1401.16.56.6.3

فتح الله نژاد دامغانی، یحیی، کاویان، عطاله و غلامی، لیلا (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر اقدامات آبخیزداری بر متغیرهای هیدرولوژیک در حوزه آبخیز محمدآباد استفاده از مدل SWAT. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۷۲-۱۵۶: (۳)۵

doi:10.22098/mmws.2025.16959.1566

References

- Aouissi, J., Benabdallah, S., Chabaâne, Z. L., & Cudennec, C. (2016). Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT-application in data-scarce rural Tunisia. *Agricultural Water Management*, 174, 39-51. doi:10.1016/j.agwat.2016.03.004
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Engineering a Sustainable Future*, 55(4), 1491-1508. doi:10.13031/2013.42256
- Awan, U. K., & Ismaeel, A. (2014). A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. *Journal of hydrology*, 519, 1368-1382. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.08.049
- Bockstiegel, M., Richard-Cerda, J. C., Muñoz-Vega, E., Haghighi, M. H., Motagh, M., Lalehzari, R., & Schulz, S. (2024). Simulation of present and future land subsidence in the Rafsanjan plain, Iran, due to groundwater overexploitation using numerical modeling and InSAR data analysis. *Hydrogeology Journal*, 32(1), 289-305. doi:10.1007/s10040-023-02657-y
- Cecconello, S. T., Bressiani, D., Nunes, M. C. M., & Timm, L. C. (2025). Analysis of SWAT+ model performance: A comparative study using different software and algorithms. *Environmental Modelling & Software*, 188, 106425. doi:10.1016/j.envsoft.2025.106425
- Fard, R., Vafakhah, M., Moradi, H. (2022). Assessment effect of the spatial resolution of digital elevation model on daily discharge estimation of Arazkuseh watershed using SWAT model. *Watershed Management Science and Engineering*, 16(56): 6. jwmsei.ir/article-1-1018-fa.html [In Persian]
- Fathollahnejad Damghani, Y., Kavian, A., Gholami, L. (2025). Assessment of the impact of watershed management practices on hydrological variables in the Mohammadabad watershed using the SWAT model. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3): 156-172. doi:10.22098/mmws.2025.16959.1566 [In Persian]
- Gasirabo, A., Xi, C., Kurban, A., Liu, T., Baligira, H. R., Umuhoza, J., ... & Dufatanye Edovia, U. (2023). SWAT model calibration for hydrological modeling using concurrent methods, a case of the Nile Nyabarongo river basin in Rwanda. *Frontiers in Water*, 5, 1268593. doi:10.3389/frwa.2023.1268593
- Gharnouki, I., Aouissi, J., Benabdallah, S., & Mosbahi, M. (2024). Hydrological modelling using SWAT in a complex semi-arid watershed. *GSC Advanced Research and Reviews*, 21(02), 238-247. doi:10.30574/gscarr.2024.21.2.0427
- Gwal, S., Gupta, S., Sena, D. R., & Singh, S. (2023). Geospatial modeling of hydrological ecosystem services in an ungauged upper Yamuna catchment using SWAT. *Ecological Informatics*, 78, 102335. doi:10.1016/j.ecoinf.2023.102335
- Hermassi, T., Jarray, F., Tlili, W., Achour, I., & Mechergui, M. (2025). SWAT-based evaluation of soil and water conservation strategies in a semi-arid watershed. *Frontiers in Water*, 7, 1521812. doi:10.3389/frwa.2025.1521812
- Hosseiniinia, M., & Hassanzadeh, R. (2023). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydrochemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. *Applied Water Science*, 13(3), 84. doi:10.1007/s13201-023-01891-9
- Hussain, S., Niyazi, B., Elfeki, A. M., Masoud, M., Wang, X., & Awais, M. (2024). SWAT-driven exploration of runoff dynamics in hyper-arid region, Saudi Arabia. *Water*, 16(14), 2043. doi:10.3390/w16142043
- Hussainzada, W., & Lee, H. S. (2021). Hydrological modelling for water resource management in a semi-arid mountainous region using the soil and water assessment tool: A case study in northern Afghanistan. *Hydrology*, 8(1), 16. doi:10.3390/hydrology8010016
- Janjic, J., & Tadic, L. (2023). Fields of application of SWAT hydrological model—a review. *Earth*, 4(2), 331-344. doi:10.3390/earth4020018
- Keller, A. A., Garner, K., Rao, N., Knipping, E., & Thomas, J. (2023). Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models. *Science of the Total Environment*,

- 867, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.161209
- Kesete, N., Moges, M. A., & Steenhuis, T. S. (2019). Evaluating the applicability and scalability of bias corrected CFSR climate data for hydrological modeling in upper Blue Nile basin, Ethiopia. In *Extreme Hydrology and Climate Variability* (pp. 11-22). doi:10.1016/B978-0-12-815998-9.00002-6
- Khaleghi, M. R., & Hosseini, S. H. (2024). Using SWAT and SWAT-CUP for hydrological simulation and uncertainty analysis of the arid and semiarid watersheds (Case study: Zoshk Watershed, Shandiz, Iran). *Applied Water Science*, 14(12), 266. doi:10.1007/s13201-024-02327-8
- Koltsida, E., Mamassis, N., & Kallioras, A. (2023). Hydrological modeling using the Soil and Water Assessment Tool in urban and peri-urban environments: The case of Kifisos experimental subbasin (Athens, Greece). *Hydrology and Earth System Sciences*, 27 (4), 917–931. doi:10.5194/hess-27-917-2023, 2023.
- Lei, Q., Zhang, T., An, M., Luo, J., Qin, L., Zhu, A. X., ... & Liu, H. (2024). Sensitivity analysis of SWAT streamflow and water quality to the uncertainty in soil properties generated by the SoLIM model. *Journal of Hydrology* 642, 131879. doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131879
- Li, S., Liu, Y., Her, Y., Chen, J., Guo, T., & Shao, G. (2021). Improvement of simulating sub-daily hydrological impacts of rainwater harvesting for landscape irrigation with rain barrels/cisterns in the SWAT model. *Science of The Total Environment*, 798, 149336. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149336
- López-Ballesteros, A., Srinivasan, R., & Senent-Aparicio, J. (2024). Introducing MapSWAT: An open source QGIS plugin integrated with google earth engine for efficiently generating ready-to-use SWAT+ input maps. *Environmental Modelling & Software*, 179, 106108. doi:10.1016/j.envsoft.2024.106108
- Lyu, K., Dong, Y., Lyu, W., Zhou, Y., Wang, S., Wang, Z., ... & Cui, Y. (2025). Data-driven and numerical simulation coupling to quantify the impact of ecological water replenishment on surface water-groundwater interactions. *Journal of Hydrology*, 649, 132508. doi:10.1016/j.jhydrol.2024.132508
- Mitova, M., Rakotoarimanana, Z., Kercheva, M., & Ishidaira, H. (2024, June). SWAT model calibration, validation and parameter sensitivity analysis using SWAT-CUP, SUFI-2 for watershed of the Rusenski Lom river, Bulgaria. In *The International Conference on Environmental Protection and Disaster Risks*, 381-390. doi:10.1007/978-3-031-74707-6_40
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Engineering a Sustainable Future*, 50(3), 885-900. doi:10.13031/2013.23153
- Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., ... & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(25), e2024221118. doi:10.1073/pnas.202422111
- Rasheed, N. J., Al-Khafaji, M. S., Alwan, I. A., Al-Suwaiyan, M. S., Doost, Z. H., & Yaseen, Z. M. (2024). Survey on the resolution and accuracy of input data validity for SWAT-based hydrological models. *Heliyon*, 10(19). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e38348
- 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): 129-139. doi:10.22034/gp.2020.40775.2656 [In Persian]
- Ruan, H., Zou, S., Yang, D., Wang, Y., Yin, Z., Lu, Z., Li, F., & Xu, B. (2017). Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Water*, 9(11), 866. doi:10.3390/w9110866
- Sarker, S., & Leta, O. T. (2025). Review of Watershed Hydrology and Mathematical Models. *Eng*, 6(6), 129. doi:10.3390/eng6060129
- Taia, S., Erraioui, L., Arjdal, Y., Chao, J., El Mansouri, B., & Scozzari, A. (2023). The application of SWAT model and remotely sensed products to characterize the dynamic of streamflow and snow in a mountainous watershed in the High Atlas. *Sensors*, 23(3), 1246. doi:10.3390/s23031246
- Veetil, A. V., Green, T. R., Kipka, H., Arabi, M., Lighthart, N., Mankin, K., & Clary, J. (2021). Fully distributed versus semi-distributed process simulation of a highly managed watershed with mixed land use and irrigation return flow. *Environmental Modelling & Software*, 140, 105000. doi:10.1016/j.envsoft.2021.105000
- Wang, Z., He, Y., Li, W., Chen, X., Yang, P., & Bai, X. (2023). A generalized reservoir module for SWAT applications in watersheds regulated by reservoirs. *Journal of Hydrology*, 616, 128770. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128770
- Woldemariam, G. W., et al. (2024). Modeling sediment yield under current and projected climatic scenarios using SWAT. *Agriculture and Environment for International Development*, 118(1). doi:10.36253/jaeid-16073

- Zahedi, E., Talebi, A., Davari, K., Mousavi, V. (2023). Simulation and zoning of evapotranspiration in Samalghan Darband watershed using SWAT model and geostatistical method. *Watershed Management Science and Engineering*, 17(61): 21-29. jwmsei.ir/article-1-1133-en.html [In Persian]
- Zaree Garizi, A., & Talebi, A. (2016). Simulation of watershed water balance using the SWAT model (Case study: Gharasoo watershed, Golestan province). *Water Resources Engineering*, 9(30), 37-50. www.civilica.com/doc/1912896 [In Persian]
- Zhang, Z. (2025). Performance of long-term continuous hydrological models in fluvial flow simulation in a large-scale river basin. *Scientific Reports*, 15(1), 22124. doi:10.1038/s41598-025-06387-x
- Zumwald, M., Knüsel, B., Baumberger, C., Hirsch Hadorn, G., Bresch, D. N., & Knutti, R. (2020). Understanding and assessing uncertainty of observational climate datasets for model evaluation using ensembles. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(5), e654. doi:10.1002/wcc.654