

Evaluation of the efficiency of the SWAT⁺ model in mountainous watersheds in arid and semi-arid regions (Case study: Meymeh watershed, Ilam)

Reza Shirkhani¹, Mohsen Tavakoli^{2*}, Ali Akbar Akhtari¹, Haidar Ebrahimi³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2. Department of Range and Watershed Management, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran

3. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran

* Corresponding author: m.tavakoli@ilam.ac.ir

(Received: 15 October 2024

Revised: 09 April 2025

Accepted: 19 May 2025)

Extended Abstract

Introduction: A watershed system regulates both the quantity and quality of water within the hydrological cycle. Challenges have arisen in managing this cycle, largely due to insufficient understanding of its complexity and inadequate planning regarding the interconnections between water resource management and community development. Effective watershed management requires comprehensive and accurate information on various technical and managerial approaches. Simulating hydrological processes within a watershed is considered a promising approach for achieving optimal management. This study aims to develop and evaluate a new rainfall-runoff model for the Meymeh Watershed as a mountainous watershed located in a semi-arid region of Ilam Province, Iran.

Materials and methods:

This study was conducted using the new SWAT⁺ model. SWAT⁺ is a powerful tool for achieving watershed management objectives, offering a flexible spatial representation of basin processes and responses. It integrates a large number of parameters, utilizes the free QGIS software, and features a robust graphical interface. The data required for this research include meteorological records from the watershed and its surrounding areas, historical flow data of the Meymeh River, a Digital Elevation Model (DEM), and geological and soil maps. Meteorological data were collected from two synoptic stations near the watershed and 20 rain gauges located within and around the watershed, sourced from governmental organizations. Historical and observed daily flow data from a hydrometric station at the watershed outlet were also obtained from existing databases. Daily meteorological and hydrological data from 2010 to 2020 were used to simulate streamflow in the study area. Considering that using multiple statistical indicators can lead to mixed interpretations of model performance, in this study were employed the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Bias Error (MBE) to evaluate the accuracy and reliability of the model.

Results and Discussion: Based on the results, NS, R^2 coefficients, MAE and MBE were obtained -0.38, 0.39, 11.1 and 8.4 respectively, using non-optimized coefficients using in the initial run of the model. According to the value of the objective functions in the first run, it was found that the SWAT⁺ model has insufficient accuracy for the watershed runoff simulation, so the calibration operation is necessary to improve its accuracy. For calibration, ten coefficients and parameters that are effective in producing watershed runoff were determined. These parameters were entered into the model along with the allowed range of their changes (Theoretically) and were real and optimized during 2000 iterations. Following this process, the R^2 , Nash-Sutcliffe coefficients, MAE and MBE for the calibration period (2010-2018) were obtained 0.72, 0.70, 2.97 and 0.58 respectively, and for the validation period (2019-2020), 0.78, 0.77, 7.6 and 0.38 respectively. In order to evaluate the ability of the model in simulating base and peak flows and also checking their temporal consistency with the observed data, scatter plots and time series of observed and simulated daily flow values were drawn for the calibration and validation periods. A detailed review of the drawn graphs showed that this model has correctly identified the time of the peak flows. Also, the daily fluctuations of the river flow are correctly modeled. From a graphical point of view, the comparison of the time series plots during the validation period shows that the SWAT⁺ model estimated the peak and base flows close to the actual values.

Conclusion: The results of this study showed that SWAT⁺ has a good ability to simulate of daily runoff in The Meymeh river watershed. It can also be applied to simulate runoff under different management scenarios and in other watersheds with similar environmental and hydrological conditions.

Keywords: Runoff, Calibration, Validation, SWAT⁺, Meymeh watershed.

Citation: Shirkhani, R., Tavakoli, M., Akhbari, A.A., & Ebrahimi, H. (2026). Evaluation of the efficiency of the SWAT⁺ model in mountainous watersheds in arid and semi-arid regions (Case study: Meymeh watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 5(4), 38-53. doi= 10.22034/iwm.2025.2043396.1180

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



ارزیابی کارایی مدل SWAT⁺ در حوزه‌های آبخیز کوهستانی مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه میمه، ایلام)

رضا شیرخانی^۱، محسن توکلی^{۲*}، علی اکبر اختری^۱، حیدر ابراهیمی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۳. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

*نویسنده مسئول: m.tavakoli@ilam.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

چکیده مبسوط

مقدمه: سیستم حوزه آبخیز، تنظیم‌کننده کمیّت و کیفیت چرخه آب می‌باشد. مشکلاتی که در عصر حاضر در این چرخه پدید آمده است (وقوع سیلاب، کم آبی و...)، هزینه‌ای است که بشر به دلیل عدم درک صحیح از این چرخه پیچیده و عدم برنامه‌ریزی در پروژه‌های مرتبط با مدیریت آب و توسعه جوامع، متحمل شده است. لذا مدیریت صحیح حوضه، مستلزم داشتن اطلاعات جامع و کامل از تکنیک‌های مختلف اجرایی و مدیریتی است. اعتقاد بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز می‌تواند راه‌حلی بهینه برای مدیریت صحیح آن‌ها باشد. هدف از پژوهش حاضر توسعه و ارزیابی یک مدل نسبتاً جدید بارش-رواناب در حوضه رودخانه میمه به عنوان یک حوضه کوهستانی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در استان ایلام می‌باشد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه با استفاده از مدل جدید SWAT⁺ انجام گرفت. مدل SWAT⁺ به دلیل فراهم نمودن یک نمایش مکانی انعطاف‌پذیر از واکنش‌ها و فرآیندهای حوضه، استفاده از تعداد زیادی پارامتر، نرم‌افزار رایگان QGIS و رابط گرافیکی قدرتمند، ابزار بسیار مفیدی برای دستیابی به اهداف مدیریتی می‌باشد. داده‌های موردنیاز این تحقیق شامل داده‌های هواشناسی حوضه و مناطق اطراف آن، داده‌های تاریخی و ثبت شده جریان رودخانه، مدل رقمی ارتفاعی، نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی است. داده‌های هواشناسی دو ایستگاه سینوپتیک واقع در اطراف حوضه و ۲۰ دستگاه باران‌سنج در داخل و اطراف حوضه از سازمان‌های دولتی اخذ شد. داده‌های تاریخی و مشاهده‌ای جریان روزانه در یک ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه (ایستگاه پل میمه) نیز از شرکت آب منطقه‌ای تهیه گردید. برای شبیه‌سازی جریان در حوضه مورد مطالعه، داده‌های روزانه هواشناسی و هیدرولوژیکی دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این که انتخاب شاخص آماری چندگانه «احتمال تفسیر ترکیبی، عملکرد مدل را افزایش می‌دهد» آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، نش ساتکلیف (NSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین خطای اریب (MBE) جهت ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث: بر اساس نتایج، ضرایب نش ساتکلیف، تعیین، MAE و MBE در اولین اجرای مدل و با استفاده از ضرایب بهینه نشده به ترتیب ۰/۳۸-، ۰/۳۹، ۱۱/۱ و ۸/۴ به دست آمدند. با توجه به مقدار توابع هدف در اجرای اول، مشخص شد که مدل SWAT⁺ فاقد دقت برای شبیه‌سازی رواناب حوضه است، بنابراین عملیات واسنجی برای بهبود دقت آن ضروری است. برای واسنجی، ده ضریب و پارامتر موثر تولید رواناب حوضه تعیین و این پارامترها به همراه محدوده مجاز تغییرات آنها (به لحاظ نظری) وارد مدل شدند و در طی ۲۰۰۰ تکرار، واقعی و بهینه شدند. پس از این فرآیند، ضرایب تعیین، نش-ساتکلیف و مقادیر MAE و MBE برای دوره واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۱۸) به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۷۰، ۲/۹۷، ۰/۵۸ و برای دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۹-۲۰۲۰) به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۷۷، ۷/۶ و ۰/۳۸ به دست آمدند. به منظور ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی‌های پایه و دبی اوج و همچنین بررسی سازگاری زمانی آنها با داده‌های مشاهده شده، نمودارهای پراکندگی و سری زمانی مقادیر جریان روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ترسیم شد. بررسی دقیق نمودارهای ترسیم شده نشان داد که این مدل، زمان پیک دبی‌ها را به درستی شبیه‌سازی کرده است. همچنین نوسانات روزانه جریان رودخانه به درستی مدل‌سازی شده است. از نقطه نظر گرافیکی، مقایسه نمودارهای سری زمانی در طول دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT⁺ جریان‌های پیک و پایه را نزدیک به مقادیر واقعی تخمین زده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که مدل SWAT⁺ توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی دبی روزانه در حوزه آبخیز رودخانه میمه دارد و می‌تواند برای شبیه‌سازی رواناب تحت سناریوهای مدیریتی مختلف و همچنین در حوضه‌های با شرایط طبیعی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: رواناب، واسنجی، اعتبارسنجی، SWAT⁺، حوضه میمه.

استناد: شیرخانی، ر.، توکلی، م.، اختری، ع. الف؛ و ابراهیمی، ح. (۱۴۰۴). ارزیابی کارایی مدل SWAT⁺ در حوزه‌های آبخیز کوهستانی مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوضه میمه، ایلام). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۵(۴)، ۳۸-۵۳.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

که با استفاده از کمترین پارامترها و پیچیدگی، نتایجی نزدیک به واقعیت ارائه دهد. در هیدرولوژی، مدل‌ها عمدتاً برای پیش‌بینی رفتار سیستم و درک فرآیندهای هیدرولوژیکی مختلف استفاده می‌شوند (Sorooshian et al., 2008; Gayathri et al., 2015). مدیران و تصمیم‌گیرندگان معمولاً از مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری برای درک چگونگی تأثیر تغییرات آب‌وهوا و شرایط کاربری زمین یا تصمیم‌های مدیریتی در مقیاس حوضه استفاده می‌کنند (Meaurio et al., 2015). علاوه بر این، پیش‌بینی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت جریان رودخانه‌ها برای اطلاع تصمیم‌گیرندگان و حمایت از آن‌ها در دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب ضروری است (Petroselli et al., 2018; Apollonio and et al., 2020; Tudose et al., 2021). در حال حاضر چندین مدل هیدرولوژیکی از جمله SWAT¹ به‌صورت رایگان در دسترس هستند. این که از دهه ۱۹۹۰ به‌طور مداوم بهبود یافته است. این مدل، یک مدل فیزیکی رایگان است که اگرچه در ابتدا برای حوضه‌های رودخانه‌های بزرگ توسعه یافته بود، اما برای حوزه‌های آبخیز تا ۱۰۰۰ کیلومترمربع نیز مناسب است (Marin et al., 2020). علاوه بر این، این مدل برای بررسی اثرات بلندمدت، به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز بدون ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مناسب تشخیص داده می‌شود (Ha et al., 2017; Jabbar et al., 2020; Tudose et al., 2021).

مدل SWAT به‌طور گسترده در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و محیطی استفاده شده است (Arnold et al., 1998; Tan et al., 2020; Akoko et al., 2021; Rufino et al., 2023). استفاده گسترده از مدل SWAT در سرتاسر جهان نیز محدودیت‌های آن را آشکار و نیازهای توسعه آن را شناسایی کرده است به‌طوری‌که الحاقات و اصلاحات متعدد مدل و اجزای منفرد آن، مدیریت و نگهداری کد

سیستم حوزه آبخیز، تنظیم‌کننده کمیت و کیفیت چرخه آب می‌باشد. مشکلاتی که در عصر حاضر در این چرخه پدید آمده است (از جمله وقوع کم‌آبی و سیل)، هزینه‌ای است که بشر به دلیل عدم درک صحیح از این چرخه پیچیده و عدم برنامه‌ریزی در پروژه‌های مرتبط با مدیریت آب و توسعه جوامع متحمل شده است. سیل‌ها پرهزینه‌ترین خطر طبیعی در جهان هستند و ۳۱ درصد از خسارات اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی را تشکیل می‌دهند (Sanders & Tabuchi, 2000; Wondim, 2016). این پدیده یکی از بلایای طبیعی بزرگ در حال افزایش است که علاوه بر تخریب و خسارات ساختاری، ممکن است اثرات فیزیکی، روانی و اجتماعی را بر جمعیت آسیب‌دیده تحمیل کند (Paranjothy et al., 2011; Alderman et al., 2013; Mohammadinia et al., 2019).

ایران کشوری بلاخیز است (Rahmati et al., 2016) که در سال ۲۰۱۵، بلایای طبیعی آن ۱۰۷ کشته و ۲۶۴۸۱ مجروح یا آسیب‌دیده است (Sanderson et al., 2016) و بر اساس آمار در سال‌های اخیر تعداد سیلاب‌ها افزایش یافته و بخش‌های مختلف کشور را تحت تأثیر قرار داده است (Mohammadinia et al., 2019).

تجزیه و تحلیل سیل به‌طور خاص، به کارشناسان منابع آب و آمار اجازه می‌دهد تا احتمال وقوع سیل در آینده و همچنین بزرگی اوج جریان را تخمین بزنند. در این راستا اعتقاد بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی (از جمله سیلاب) در حوزه آبخیز می‌تواند راه‌حلی بهینه برای مدیریت صحیح آن‌ها باشد.

برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و سیلاب چندین رویکرد مانند قطعی، احتمالی و تصادفی وجود دارد (Machekposhti et al., 2017). مدل یک نمایش ساده از سیستم دنیای واقعی است و بهترین مدل، مدلی است

1. Soil and Water Assessment Tool.

مطالعات انجام شده در کشور و (۲) ارزیابی کارایی آن با توجه به ویژگی‌های محلی یک حوضه کوهستانی در یک منطقه نیمه‌خشک. با توجه به اینکه یک سد مخزنی در خروجی حوضه در حال ساخت است و جمعیت محلی زیادی به مخزن آن وابسته است، مدل SWAT+ واسنجی شده و تأیید شده ابزار ارزشمندی برای تصمیم‌گیرندگان محلی و ملی است و با شبیه‌سازی سناریوهای احتمالی و پیش‌بینی نتایج، کمک چشمگیری در طراحی استراتژی‌های جدید مدیریت منابع آب به‌ویژه مدیریت عرضه و تقاضا، سیل و بار خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه میمه در شهرستان دهلران در جنوب استان ایلام (بین عرض‌های جغرافیایی ۱۹° ۳۲ تا ۴۲° ۳۳ شمالی و طول جغرافیایی ۱۸° ۴۶ و ۴۶° ۴۶ شرقی) واقع شده است. این حوضه از دو ناحیه کوهستانی و تپه‌ماهور تشکیل شده و حداقل و حداکثر ارتفاع آن به ترتیب ۲۱۶ و ۲۴۸۶ متر از سطح دریا است (شکل ۱). طول رودخانه اصلی حوضه مورد مطالعه ۱۱۵ کیلومتر است که از به هم پیوستن دو شاخه به نام‌های میمه و گوراب تشکیل می‌شود و سپس ۴ رودخانه فرعی به آن می‌ریزد که از بالادست به سمت پایین دست عبارت‌اند از خرزان، شهرامیر، ورازان و سرکده (ترکیب قده و سیول). این حوضه با مساحت ۱۶۳۳ کیلومتر مربع بر اساس طبقه‌بندی هیدرولوژیکی به ۱۰ زیرحوضه تقسیم می‌شود.

براساس روش طبقه‌بندی اقلیم دمارتن، این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۴۳۳ میلی‌متر است. بخش عمده بارندگی منطقه در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد و میانگین دمای سالانه هوا ۲۷ درجه سانتی‌گراد است. سازندهای عمده زمین‌شناسی حوضه عبارت‌اند از گچساران (Gs)، پابده (Pd)، سروک (Sv)، آسماری (As)، رسوبات کواترنر (Qt)، بخش امام حسن (Ehm)، پابده-گورپی (Pd-

آن را به‌طور فزاینده‌ای دشوار کرده است (Bieger et al., 2017).

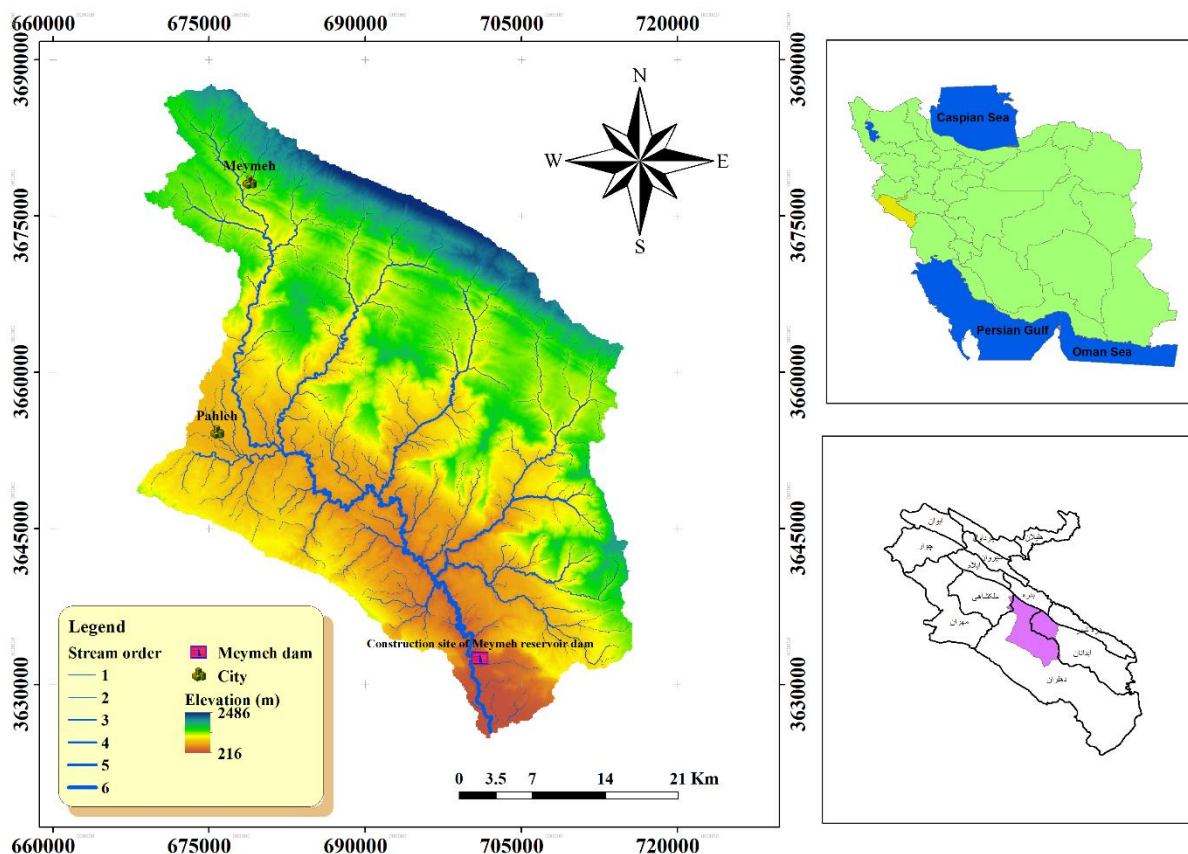
به‌منظور مواجهه با چالش‌های حال و آینده در مدل‌سازی منابع آب، کد SWAT در چند سال گذشته دستخوش تغییرات عمده‌ای شده است که منجر به انتشار مدل SWAT+، به‌عنوان نسخه‌ای کاملاً اصلاح‌شده مدل شده است. SWAT+ نمایش مکانی انعطاف‌پذیرتری از فعل‌وانفعالات و فرآیندهای درون یک حوزه آبخیز را ارائه می‌کند (Bieger et al., 2017). با توجه به اینکه این مدل در سال ۲۰۱۷ معرفی شده است، تاکنون مطالعات زیادی با استفاده از آن انجام نشده است و کارایی و عملکرد آن در مناطق مختلف جهان و همچنین در ایران نامشخص است؛ بنابراین، در میان طیف گسترده‌ای از مدل‌های هیدرولوژیکی توسعه‌یافته تا امروز، برای این مطالعه، مدل هیدرولوژیکی SWAT+ را به دلیل سازگاری و انعطاف‌پذیری بالا برای بررسی طیف گسترده‌ای از مسائل مربوط به آب، با استفاده از پارامترهای زیاد، از نرم‌افزار رایگان QGIS و با کاربرد گرافیکی انتخاب شده است. کد SWAT+ ابزار ارزشمندی است که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند و آن‌ها را قادر می‌سازد تا مجموعه‌ای از تأثیرات را پیش‌بینی کنند و از این‌رو، اقدامات موردنیاز برای کاهش خطرات آینده را شناسایی و اولویت‌بندی کنند (Tudose et al., 2021). از معدود مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل SWAT+ می‌توان به مطالعه Bieger et al., 2017 در آمریکا Kakarnde et al., 2020 در تایلند، Van Tol Wanger et al., 2021 در آفریقای جنوبی، Sharma et al., 2024 در آمریکا، Tigabu et al., 2024 در آمریکا و Hadi Qoraqi, 2024 در حوضه آبریز طشک بختگان در ایران اشاره نمود که بر اساس نتایج آن‌ها عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است.

در این راستا، نوآوری و اهداف ویژه این تحقیق عبارت‌اند از: (۱) اختصاصی نمودن پایگاه‌های داده مدل SWAT+ برای حوضه میمه به‌عنوان یکی از اولین

(مساحت) و مرتع و جنگل (بیش از ۹۵ درصد مساحت) مشخص می‌شود. همچنین دارای ۲ شهر و ۲۶ روستا و ۱۱۱۶۰ نفر جمعیت می‌باشد (Ilam Regional Water Company, 2021).

(Gu)، آغاچاری (Aj) و کمتر از ۵ درصد سایر سازندها (Ilam Regional Water Company, 2021).

حوضه میمه با انواع کاربری اراضی مختلف شامل زمین‌های کشاورزی، مناطق شهری (حدود ۴ درصد



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه در ایلام و ایران
Figure 1- Location of the study area in Ilam and Iran

مدل کل حوضه را به حوضه‌های فرعی تقسیم می‌کند که بیشتر به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU¹) بر اساس کاربری زمین، پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک تقسیم می‌شوند. داده‌های بارش روزانه، حداکثر و حداقل دمای هوا، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی هوا و سرعت باد ورودی‌های مورد استفاده در این مدل هستند و قادر به توصیف گردش آب و رسوب می‌باشد (Gayathri et al., 2015). در SWAT+ به‌عنوان نسخه‌ای کاملاً اصلاح‌شده از مدل SWAT،

مدل SWAT+

در طول ۲۰ سال گذشته، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) به‌طور گسترده در سراسر جهان، مورد استفاده قرار گرفته است. مدل SWAT یک مدل بر پایه پیچیدگی‌های فیزیکی است و برای آزمایش و پیش‌بینی چرخه آب و رسوب و تولیدات کشاورزی با مصرف کودهای شیمیایی در حوضه‌های فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری طراحی شده است. این مدل در انجام شبیه‌سازی‌های طولانی‌مدت کارآمد است. این

فعل‌وانفعالات و فرآیندهای درون یک حوزه آبخیز به‌عنوان ماژول‌های مستقل بازسازی شده‌اند به‌طوری‌که خطاهای آن کمتر و توسعه آن نیز بسیار آسان‌تر است. علاوه بر مدل‌سازی جدید، پیشرفت‌های کلیدی نیز برای افزایش عملکرد مدل وجود دارد. به‌عنوان مثال، عملکردهای جدید سفره‌های آب زیرزمینی و دستورالعمل بهره‌برداری مخزن (منحنی فرمان) در SWAT+ موجود است. سفره‌های آب به‌طور انحصاری در HRUها کنترل می‌شوند و مرزهای آبخوان مربوطه را می‌توان به‌صورت انعطاف‌پذیر و بدون پیروی از محدودیت‌های HRU تعریف کرد (Bieger *et al.*, 2017). یکی از موانع و محدودیت‌های اولیه مدل SWAT، در مورد عملکرد مخزن می‌باشد. با توجه به اینکه مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی است، امکان تعریف تمام سازه‌ها به‌صورت مجزا نیست؛ بنابراین حجم ذخیره تمامی سازه‌های موجود در هر زیرحوضه با هم جمع شده و به‌عنوان یک مخزن یکپارچه در انتهای هر زیرحوضه تعریف می‌شود. همچنین رهاسازی مخازن ممکن است نقش مهمی در پاسخ‌های حوزه‌های آبخیز داشته باشد، به‌ویژه برای حوضه‌هایی که مساحت نسبتاً بزرگ‌تری دارند. کاربران می‌توانند قوانین عملیات دقیقی را بدون زحمت در SWAT+ اختصاص دهند تا خروجی‌های شبیه‌سازی مخزن به روال عملیات واقعی بسیار نزدیک‌تر باشد (Yen *et al.*, 2019). همچنین ماژول‌های مکانی دیگری با عملکردهای مشخص در مدل SWAT+ در مقایسه با SWAT وجود دارد: (۱) خروجی‌ها، می‌توانند برای افزودن یا حذف آب از حوضه استفاده شوند. (۲) کانال-ها می‌توانند برای انجام انحراف آب در میان مناطق آبیاری استفاده شود. (۳) پمپ‌ها را می‌توان در هر آبخوان به نقاط مکانی مشخص اضافه کرد و (۴) حقایقه‌ها، می‌تواند با سهم‌های متفاوتی از تقاضای آب اختصاص یابد (Yen *et al.*, 2019).

واسنجی مدل

بر اساس منابع موجود برای واسنجی مدل SWAT+ تا زمان انجام این پژوهش ۵ روش معرفی شده است که

شامل واسنجی دستی با استفاده از امکانات داخل SWAT+ Toolbox، نرم‌افزار SWAT+ Toolbox، ابزار IPEAT+، محیط R-SWAT و SWATplus-CUP می‌باشند. در این پژوهش ابتدا تلاش شد مدل با استفاده از روش واسنجی دستی و استفاده از امکانات SWAT+ واسنجی شود. برای این کار پارامترهای موردنظر در تکرارهای فراوان (حدود ۲۰۰ تکرار) تغییر و مدل اجرا گردید اما تغییری در نتایج مدل حاصل نشد و تمام راه‌های ممکن برای حل مشکل این روش بررسی گردید اما در نهایت نتایج مناسبی به دست نیامد. با توجه به کار نبودن روش واسنجی دستی در این حوضه، تصمیم به استفاده از نرم‌افزار SWAT+ Toolbox جهت واسنجی به کار گرفته شد که فاقد خطا و اشکال بود و عملیات واسنجی با استفاده از آن صورت گرفت.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های موردنیاز این تحقیق شامل داده‌های هواشناسی حوضه و مناطق اطراف آن، داده‌های تاریخی و ثبت‌شده جریان رودخانه میمه، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی است. داده‌های هواشناسی دو ایستگاه سینوپتیک واقع در اطراف حوضه و ۲۰ ایستگاه باران‌سنجی در داخل و اطراف حوضه از سازمان‌های دولتی اخذ شد. داده‌های تاریخی و مشاهده‌ای جریان روزانه در ایستگاه هیدرومتری پل میمه واقع در خروجی حوضه نیز از پایگاه‌های داده موجود استخراج شده است (جدول ۱ و شکل ۲ الف)). پس از بررسی اولیه داده‌های هیدرومتری و هواشناسی، با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی داده‌ها، یک دوره آماری ۱۱ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۰) انتخاب شد که مطابق با روش مطالعات متعدد و مشابه که ۵۰ تا ۷۰ درصد داده‌ها در ابتدای دوره، برای واسنجی و باقیمانده را برای اعتبارسنجی اختصاص داده‌اند، ۹ سال ابتدایی دوره برای مرحله واسنجی مدل (۲۰۱۸ - ۲۰۱۰) و ۲ سال پایانی آن (۲۰۲۰ - ۲۰۱۹) نیز برای مرحله اعتبارسنجی استفاده شد.

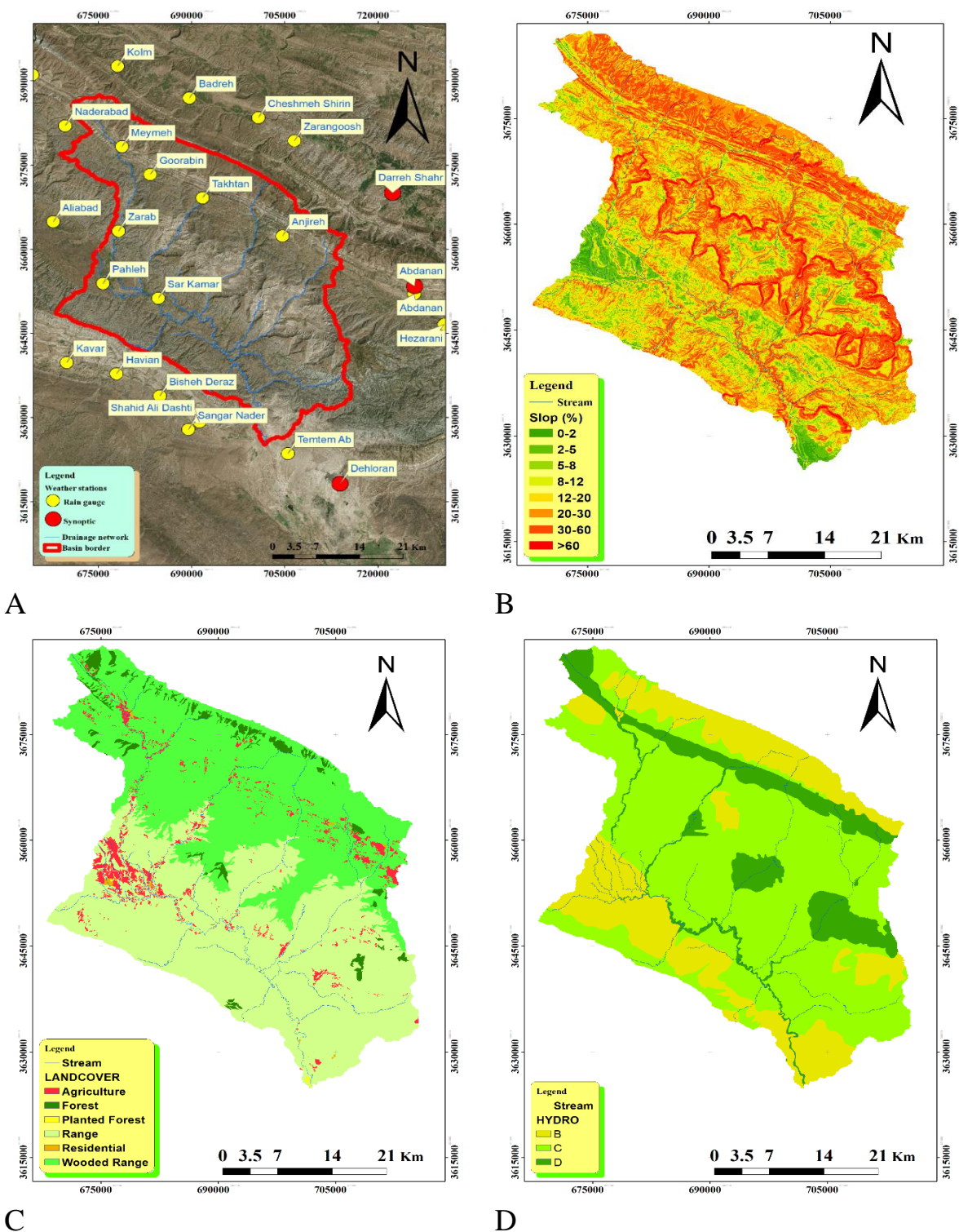
می‌باشد و کاربری‌های کشاورزی (زراعت و باغداری) و مسکونی در حدود ۴ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. برای تهیه نقشه خاک حوضه، سه طبقه خاک تعریف و برای تکمیل اطلاعات خاک مانند بافت خاک و هدایت هیدرولیکی، نقشه‌های تهیه‌شده در مطالعات قبلی (مطالعه و طراحی شبکه پایش کیفیت منابع آب حوضه آبریز دهلران، انجام‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای ایلام)، اطلاعات پروفیل‌های حفرشده و نرم‌افزار SHPC استفاده شد (شکل ۲ (د)).

نقشه DEM حوضه با استفاده از نقشه توپوگرافی ۲۰ متری تهیه شد و با استفاده از آن، نقشه شیب تولید گردید (شکل ۲ (ب)). نقشه کاربری اراضی با بهره‌گیری از نقشه‌های تهیه‌شده مطالعات پیشین، در محیط GIS تهیه شد (Ilam Regional Water Company, 2021). به‌منظور اعتبارسنجی نقشه کاربری اراضی تهیه‌شده، از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین بازدیدهای میدانی و تطبیق اطلاعات استفاده شد (شکل ۲ (ج)). بر این اساس، بیش از ۹۳ درصد منطقه مرتع (مشجر و غیرمشجر) و ۲/۶ درصد جنگل (طبیعی و دست‌کاشت)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری

Table 1- Characteristics of weather and hydrometric stations

ردیف	نام ایستگاه	نوع	مختصات جغرافیایی		متوسط بارش سالانه (mm)	سال تأسیس
			طول جغرافیایی (درجه اعشاری)	عرض جغرافیایی (درجه اعشاری)		
1	جاده دهلران	هیدرومتری	47.156	32.743	----	1960
2	دهلران	سینوپتیک	47.281	32.681	240	1987
3	آبدانان	سینوپتیک	47.418	32.996	580	2005
4	آبدانان	باران‌سنجی	47.417	32.983	589	1987
5	انجیره	باران‌سنجی	47.192	33.081	531	1997
6	بیشه دراز	باران‌سنجی	46.975	32.827	290	1990
7	پهله	باران‌سنجی	46.882	33.009	479	1989
8	تختان	باران‌سنجی	47.056	33.144	614	1989
9	تماتم	باران‌سنجی	47.193	32.731	226	1999
10	زراب	باران‌سنجی	46.910	33.093	431	1998
11	سرکمر	باران‌سنجی	46.976	32.984	386	1999
12	سنگر نادر	باران‌سنجی	47.023	32.772	244	1999
13	شهید علی دشتی	باران‌سنجی	47.042	32.784	286	1999
14	علی آباد	باران‌سنجی	46.798	33.110	341	1997
15	کاور	باران‌سنجی	46.817	32.883	251	1999
16	گورابین	باران‌سنجی	46.967	33.183	406	1999
17	نادرآباد	باران‌سنجی	46.822	33.264	562	1998
18	میمه	باران‌سنجی	46.919	33.229	530	1995
19	هاویان	باران‌سنجی	46.902	32.864	376	1996



شکل ۲- نقشه‌های منطقه مورد مطالعه: (a) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی (b) طبقات شیب حوضه (c) کاربری اراضی حوضه (d) گروه‌های هیدرولوژی خاک

Figure 2- Maps of the study area; (a) Location of weather stations (b) Watershed slope classes (c) Land use of the watershed (d) Soil hydrological groups

تعیین (R^2) و نش ساتکلیف (NSE). انتخاب شاخص آماری چندگانه «احتمال تفسیر ترکیبی، عملکرد مدل را افزایش می‌دهد» (Tudose et al, 2021). ضریب

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل آماره‌های زیر به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود: ضریب

شاخص میانگین خطای اریب (MBE^2)، میانگین انحراف مقدار برآوردی از مقدار مشاهده‌ای است، مقدار این شاخص هرچه به صفر تمایل داشته باشد نشان‌دهنده تخمین بهتر مدل در برآورد مقادیر متغیر موردنظر است. به عبارتی این شاخص کارایی مدل را در برآورد مقادیر نشان می‌دهد. اگر مقدار شاخص بزرگ‌تر از صفر باشد نشان‌دهنده این است که مدل متغیر موردنظر را بیشتر تخمین زده است و اگر کوچک‌تر از صفر باشد نشان‌دهنده این است که میزان متغیر توسط مدل کمتر تخمین زده است و اگر مقدار شاخص برابر صفر باشد نشانگر عدم وجود خطا است. فرمول محاسبه MBE به صورت رابطه ۴ است:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن n : تعداد کل نمونه‌ها، x_i : مقادیر پیش‌بینی شده و x : مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد.

نتایج

بر اساس نتایج اولین اجرای مدل با پارامترها و ضرایب پیش‌فرض، ضریب NSE و R^2 به ترتیب ۰/۳۸- و ۰/۳۹ به دست آمد. با توجه به مقادیر تابع هدف در این مرحله، مشخص شد که مدل SWAT+ فاقد دقت برای شبیه‌سازی رواناب حوضه است، بنابراین عملیات واسنجی برای بهبود دقت آن ضروری است (شکل‌های ۳ و ۴). برای مرحله واسنجی، ده ضریب و پارامتر مؤثر بر رواناب حوضه به همراه محدوده مجاز تغییرات آن‌ها (به لحاظ نظری) وارد مدل شدند و در طی ۲۰۰۰ تکرار، واقعی و بهینه شدند (جدول ۲). در این مرحله دقت شبیه‌سازی با استفاده از ضرایب NSE و R^2 بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۳) مقادیر توابع ارزیابی مدل را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT+ در دوره اعتبارسنجی نسبت

تعیین میزان هم‌خطی بودن مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده را منعکس می‌کند و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این شاخص بین صفر و ۱ است که در آن صفر هیچ همبستگی را توصیف نمی‌کند، در حالی که ۱ تطابق کامل را نشان می‌دهد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Qsim_i - Qsim_m)(Qobs_i - Qobs_m)]^2}{\sum_{i=1}^n (Qsim_i - Qsim_m)^2 \sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qobs_m)^2} \quad (۱)$$

که در آن Qobs: دبی اندازه‌گیری شده، Qsim: دبی شبیه‌سازی‌شده، $Qobs_m$: میانگین دبی اندازه‌گیری شده و $Qsim_m$: میانگین دبی شبیه‌سازی‌شده است. ضریب NSE تناسب ۱:۱ بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده را با استفاده از رابطه (۲) برجسته می‌کند:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n [Qobs_i - 1/n \sum_{i=1}^n Qobs_i]^2} MBE \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)$$

که در آن Qsim دبی شبیه‌سازی‌شده و Qobs دبی اندازه‌گیری‌شده است.

میانگین خطای مطلق (MAE^1)، معیاری است که برای ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی در یادگیری ماشین به کار گرفته می‌شود. عمده کاربرد میانگین خطای مطلق در سنجش دقت پیش‌بینی‌ها است. در محاسبه این معیار از تفاضل مطلق میان داده‌های حقیقی و پیش‌بینی‌شده، میانگین گرفته می‌شود. به‌طور معمول زمانی از MAE استفاده می‌شود که بخواهیم کیفیت پیش‌بینی‌ها را نسبت به اندازه مطلق و نه اندازه نسبی آن‌ها ارزیابی کنیم. همان‌طور که از نام آن نیز مشخص است، در میانگین خطای مطلق یا MAE از قدر مطلق خطاهای مدل میانگین گرفته می‌شود. فرمول محاسبه MAE به صورت رابطه ۳ است:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x| \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، n : تعداد کل نمونه‌ها، x_i : مقادیر پیش‌بینی شده و x : مقادیر حقیقی می‌باشد.

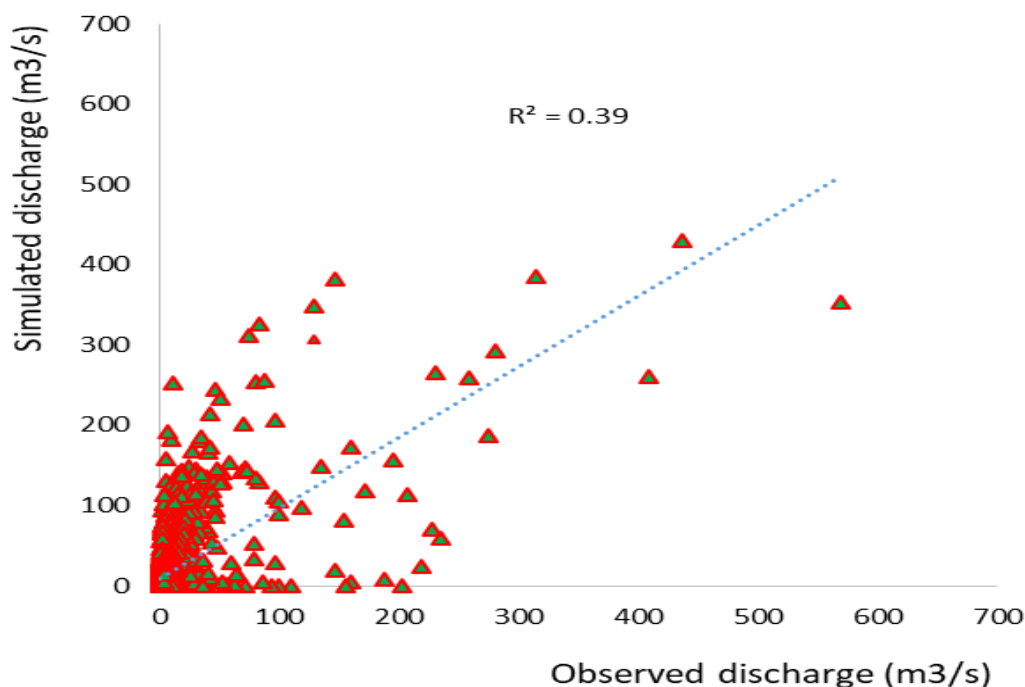
مقادیر جریان روزانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ترسیم شد (شکل‌های ۵ تا ۸).

به دوره واسنجی عملکرد بهتری داشته است. به‌منظور ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی دبی پایه و دبی پیک و همچنین بررسی سازگاری زمانی آن‌ها با داده‌های مشاهده‌شده، نمودارهای پراکندگی و سری زمانی

جدول ۲- مقادیر بهینه‌شده پارامترهای تعیین‌شده به‌منظور منطقه‌ای نمودن مدل SWAT+ در فرآیند واسنجی

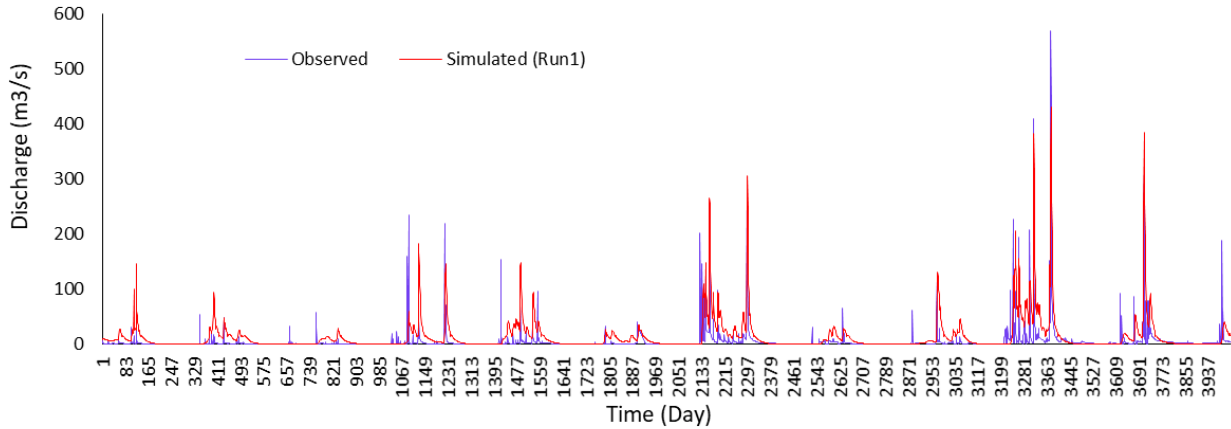
Table 2- The optimized values of the parameters to localize the SWAT+ model in the calibration process.

ردیف	نام پارامتر	واحد اندازه‌گیری	نوع تغییرات	مقدار بهینه	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
1	CN2.hru		نسبی	13.867	-60	15
2	ALPHA.aqu	روز	مطلق	0.898	0	1
3	CH_N.rte		نسبی	-59.977	-60	60
4	CH_K.rte	mm/hr	نسبی	5.853	-40	40
5	AWC.sol	mm-H2O/mm	نسبی	31.2	-40	40
6	K.sol	mm/hr	نسبی	-95.620	-300	40
7	ESCO.hru		نسبی	-54.320	-60	60
8	REVAP_MN.aqu	m	مطلق	6.912	0	50
9	REVAP_CO.aqu		مطلق	0.079	0.02	0.2
10	SURLAG.bsn	روز	مطلق	4.38	0.05	24



شکل ۳- همبستگی داده‌های جریان روزانه شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای پیش از واسنجی مدل.

Figure. 3- Correlation between observed and simulated daily flow data before calibration



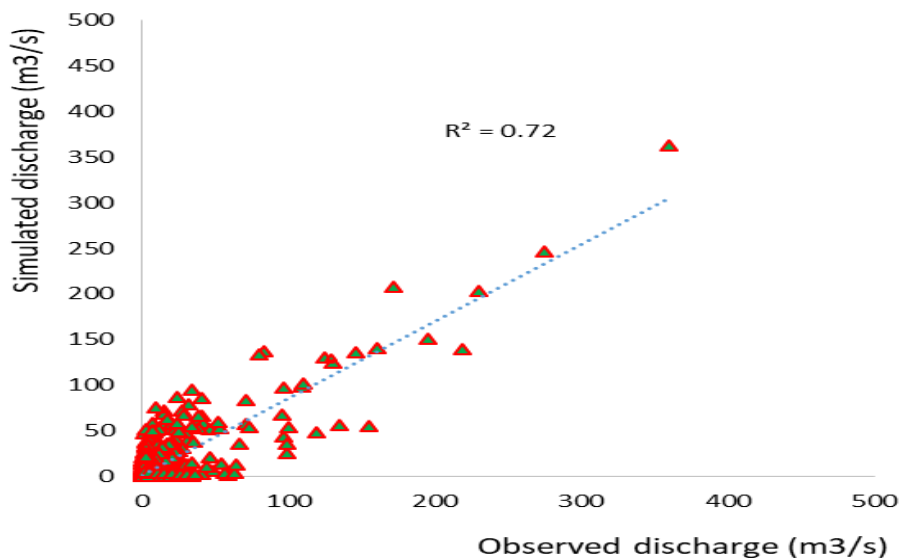
شکل ۴- هیدروگراف جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده پیش از واسنجی مدل (۲۰۱۰-۲۰۲۰)

Figure 4- Observed and simulated flow hydrograph before model calibration (2010 to 2020)

جدول ۳- دقت مدل‌سازی در اجرای اول، مرحله واسنجی و مرحله اعتبارسنجی

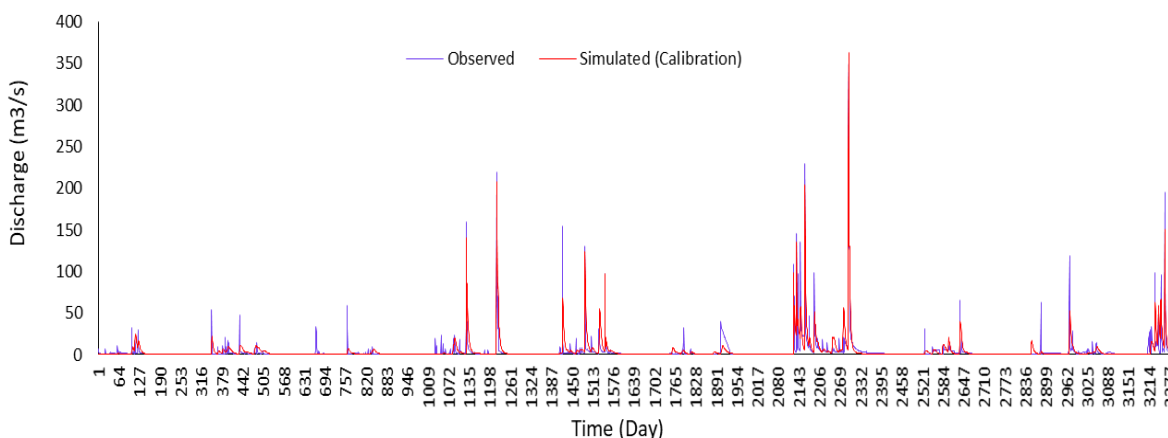
Table 4- Model accuracy in first run, calibration and validation periods

مرحله واسنجی (دوره ۲۰۱۸ - مرحله صحت سنجی (دوره ۲۰۲۰ - ۲۰۱۹ میلادی)		مرحله واسنجی (دوره ۲۰۱۸ - ۲۰۱۰ میلادی)		اولین اجرا با داده‌های پیش فرض (دوره ۲۰۲۰ - ۲۰۱۰ میلادی)		توابع هدف (شاخص‌های ارزیابی مدل)
مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده	
0.02	0.00	0	0	0.04	0	حداقل (m³/s)
569	432.4	363	360	430	569	حداکثر (m³/s)
10.49	10.87	4.25	3.67	13.46	5.02	متوسط (m³/s)
0.78		0.72		0.39		(R ²)
0.77		0.70		-0.38		(NS)
7.6		2.97		11.1		MAE
0.37		0.58		8.4		MBE



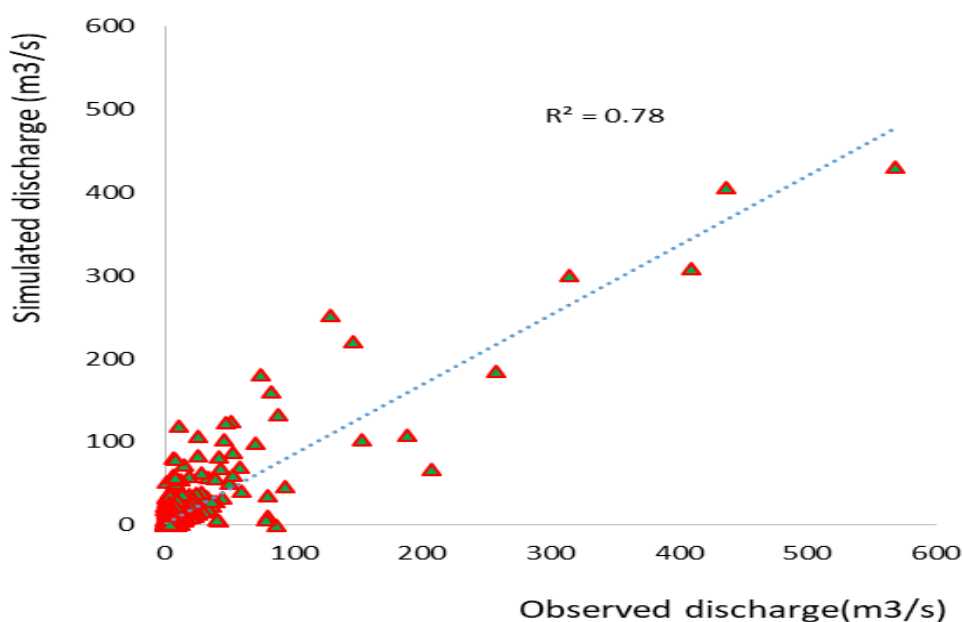
شکل ۵- همبستگی بین داده‌های جریان روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۱۸)

Figure 5- Correlation between observed and simulated daily flow data in the calibration period (2010 to 2018)



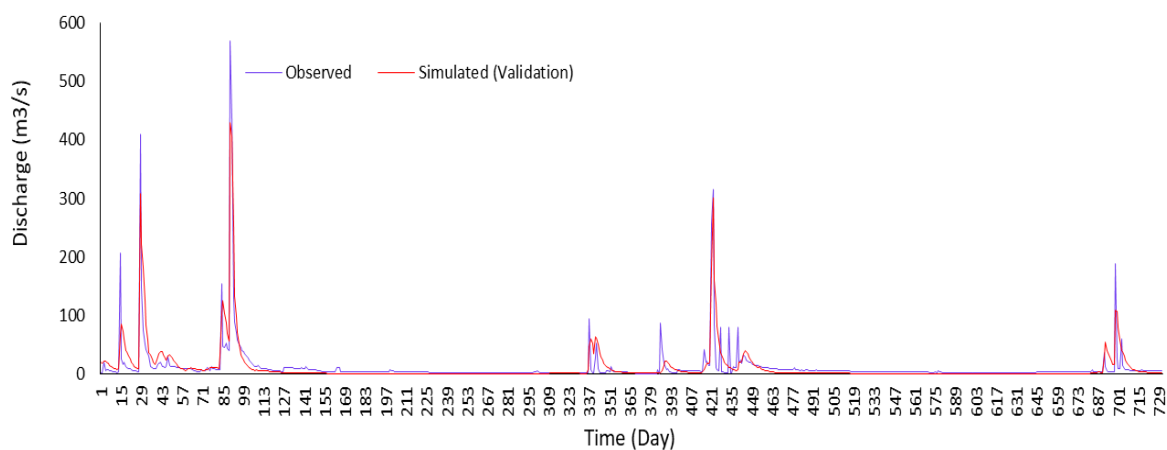
شکل ۶- هیدروگراف جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۱۸)

Figure 6- Observed and simulated flow hydrograph in the calibration period (2010 to 2018)



شکل ۷- همبستگی بین داده‌های جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۹-۲۰۲۰).

Figure 7- Correlation between observed and simulated daily flow in the validation period (2019 to 2020)



شکل ۸- هیدروگراف جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دوره اعتبارسنجی (۲۰۱۹-۲۰۲۰)

Figure 8- Observed and simulated flow hydrograph in the validation period (2019 to 2020)

بحث

عوامل متعددی در دقت نتایج مدل‌سازی دخیل هستند. برخی از این عوامل مربوط به شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه و صحت اطلاعات جمع‌آوری شده و دسته دیگر مربوط به نقاط ضعف مدل در شبیه‌سازی هستند. تحقیق حاضر نشان داد که بین داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT+ با داده‌های مشاهده شده در حوضه، همبستگی مطلوبی وجود دارد؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که این مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه عملکرد خوبی داشته است (Moriasi et al., 2007). این مدل زمان پیک دبی‌ها را به درستی شناسایی کرده است. همچنین نوسانات روزانه جریان رودخانه به درستی مدل‌سازی شده است. از نقطه نظر گرافیکی، مقایسه نمودارهای سری زمانی در طول دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل SWAT+ جریان‌های پیک و پایه را نزدیک به مقادیر واقعی، اما اغلب دبی‌های پیک را کمتر تخمین زده است. بر اساس مقادیر شاخص‌های ارزیابی و مقایسه با پژوهش‌های مشابه (Moriasi et al., 2007) و با توجه از انتظارات از یک مدل در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده طبیعی، به طور کلی، مدل، عملکرد خوبی داشته است و دبی‌های حداکثر آن با رویدادهای بارش که داده‌های دقیق تری نسبت به داده‌های دبی هستند تناسب زمانی بسیار خوبی دارند اما در مواردی، بین دبی‌های حداکثر مشاهده‌ای و رویدادهای بارش تناسب زمانی دیده نمی‌شود که این نشان‌دهنده خطا در ثبت داده‌های حدی دبی می‌باشد. همچنین از آنجاکه داده‌های حدی دبی با تخمین محاسبه می‌شوند باعث خطا در برآورد مقادیر دقیق آن‌ها شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد مدل SWAT+ در سال ۲۰۱۷ معرفی شده است و مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات زیادی در ارتباط با عملکرد آن صورت نگرفته و مطالعات انجام شده انگشت‌شمار می‌باشد که در ادامه نتایج برخی از آن‌ها با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شده است:

Kakarndee و Kositsakulchai (۲۰۲۰)، مدل SWAT و SWAT+ را برای شبیه‌سازی جریان یک رودخانه با کاربری شالیزار در بالادست در شمال شرق تایلند مقایسه نمودند. آن‌ها در مطالعه خود از داده‌های آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ استفاده نمودند. بر اساس نتایج، ضرایب R^2 و NSE کمتر از ۰/۵۰ به دست آمد که از نظر ایشان خروجی مدل‌ها، با داده‌های پیش‌فرض رضایت‌بخش نبوده است. این نتیجه با نتایج اولین اجرای مدل در این تحقیق که با داده‌ها و ضرایب پیش‌فرض مدل انجام گرفت منطبق می‌باشد.

Bieger و همکاران (۲۰۱۷) با یک رویکرد هیدروپدولوژیکی جریان رواناب را در یک حوضه در آفریقای جنوبی با استفاده از مدل SWAT+ شبیه‌سازی نمودند و مقادیر R^2 و NSE را به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۰ به دست آوردند. ایشان موفقیت شبیه‌سازی را خوب توصیف و تأکید کردند که در این مدل‌سازی از داده‌های ورودی و مشاهداتی دقیق استفاده نموده‌اند. مقایسه شاخص‌های ارزیابی مطالعه ایشان با تحقیق حاضر نشان می‌دهد که عملکرد مدل در آن مطالعه بهتر بوده است که این می‌تواند به علت استفاده ایشان از داده‌های دقیق باشد اما نکته‌ای که وجود دارد این است که حتی با وجود داده‌های دقیق، شاخص‌های ارزیابی به حداکثر خود نرسیده‌اند که این موضوع آشکار می‌کند که باید انتظارات از یک مدل در پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده طبیعی را تعدیل نمود.

Tigabu (۲۰۲۴)، از مدل SWAT+ برای پیش‌بینی بخش‌های مختلف یک هیدروگراف جریان مدیریت شده در یک رودخانه در ایالت کالیفرنیا استفاده نمودند. ایشان بیان داشتند که مطالعات مختلف در سراسر جهان نشان داده‌اند که به‌روزرسانی مقادیر پارامتر مدل و به‌کارگیری توابع چندهدفه برای بخش‌های مختلف جریان می‌تواند قابلیت‌های پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیکی را افزایش دهد که نیاز مدل به واسنجی در پژوهش حاضر، نتایج تحقیق ایشان را تأیید می‌نماید.

رضایت‌بخش و قابل‌قبول بوده است اما تجربه ما در استفاده از مدل SWAT+ نقاط قوت آن را نسبت به مدل SWAT از جمله ارائه نتایج به‌صورت گرافیکی، امکان تعریف کانال‌ها در حوزه آبخیز که دست محقق را برای ارزیابی سناریوهای مختلف بازتر می‌نماید، امکان تعریف خصوصیات دشت سیلابی که بر روی روندیابی جریان تأثیرگذار می‌باشد، انعطاف بیشتر مدل برای بررسی سناریوهای مختلف، رایگان بودن QGIS به‌عنوان رابط گرافیکی و روش‌های متنوع واسنجی مدل، آشکار نمود.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اطلاعات موردنیاز مدل SWAT+، می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های آبخیز مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی ایران استفاده کرد، هرچند عدم وجود نقشه‌های کاربری اراضی و خاک با دقت نامناسب بر نتایج اثر نامطلوب دارد و این امر بنا به نتایج این پژوهش و پژوهش‌های مشابه، ضرورت واسنجی مدل را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. همچنین با توجه به محدودیت کنونی تعداد داده‌های متناظر هواشناسی و دبی مشاهداتی، بررسی میزان تأثیر افزایش طول دوره واسنجی بر نتایج و عملکرد مدل، به‌عنوان یک موضوع تحقیقاتی برای آینده پیشنهاد می‌گردد.

Sharma و همکاران (۲۰۲۴)، عملکرد مدل SWAT+ را در مدیریت زهکشی آب در یک حوزه آبخیز در شمال آلمان بررسی نمودند. ایشان در مطالعه خود دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ را مورد بررسی قرار دادند و دو سال ابتدایی دوره را (۲۰۱۶ - ۲۰۱۷) جهت واسنجی و پایانی دوره را (۲۰۱۸) جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار دادند. بر اساس نتایج، مقدار NSE در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۷۱ به دست آمد و عملکرد مدل، رضایت‌بخش ارزیابی گردید که هرچند شاخص NSE در پژوهش حاضر کمتر به دست آمده است اما با توجه به منابع موجود که مقدار بالاتر از ۰/۵۰ را رضایت‌بخش می‌دانند می‌توان نتیجه گرفت که نتیجه پژوهش حاضر با نتایج تحقیق ایشان نسبتاً منطبق می‌باشد.

Qoraqi و Delavar (۲۰۲۴)، تغییرات مؤلفه بیلان آب را با استفاده از مدل SWAT+ در ۱۰ ایستگاه هیدرومتری حوضه طشک-بختگان در جنوب استان فارس در ایران بررسی نمودند. ایشان مقادیر شاخص NSE بیشتر از ۰/۲ و R^2 بیشتر از ۰/۵ که برای ایستگاه‌های هیدرومتری بررسی شده به دست آمده بود را مطلوب و قابل‌قبول ارزیابی نمودند. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که مدل در تحقیق حاضر عملکرد بهتری نشان داده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که عملکرد مدل SWAT در اغلب نقاط جهان در شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز

References

- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A review of SWAT model application in Africa. *Water*, 13(9), 1313. <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Alderman, K., Turner, L. R., & Tong, S. (2013). Assessment of the health impacts of the 2011 summer floods in Brisbane. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 7(4), 380-386. <https://doi.org/10.1017/dmp.2013.42>
- Apollonio, C., Bruno, M. F., Iemmolo, G., Molfetta, M. G., & Pellicani, R. (2020). Flood risk evaluation in ungauged coastal areas: The case study of Ippocampo (Southern Italy). *Water*, 12(5), 1466. <https://doi.org/10.3390/w12051466>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., & Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *Journal of the American Water Resources*

- Association, 53(1), 115–130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>
- Gayathri, K. D., Ganasri, B.P., & Dwarakish, G.S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Ha, L., Bastiaansen, W., van Griensven, A., van Dijk, A., & Senay, G. (2017). SWAT-CUP for calibration of spatially distributed hydrological processes and ecosystem services in a Vietnamese river basin using remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-251>
- Hadi Qoraqi, R., & Delavar, M. (2024). Investigating changes in water balance components using the SWAT+ model and determining the role of factors affecting them. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(4), 1071–1092. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358050.1066>
- Hamidi Machekposhti, K., Sedghi, H., Telvari, A., & Babazadeh, H. (2017). Flood analysis in Karkheh River Basin using stochastic model. *Civil Engineering Journal*, 3(9), 794–808. <http://dx.doi.org/10.21859/cej-030915>
- Ilam Regional Water Company. (2021). *Study and design of monitoring network for the quality of water resources in the Dehhran watershed*. (In Persian)
- Jabbar, F. K., & Grote, K. (2020). Evaluation of the predictive reliability of a new watershed health assessment method using the SWAT model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 224. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8182-9>
- Kakarndee, I., & Kositsakulchai, E. (2020). *Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddyfield-dominated basin, northeast Thailand*. The 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference (TSAE 2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018706002>
- Maite Meaurio, Zabaleta, A., Uriarte, J. A., Srinivasan, R., & Antigua, I. (2015). Evaluation of SWAT model performance to simulate streamflow spatial origin: The case of a small forested watershed. *Journal of Hydrology*, 525, 326–334. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.050>
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A., Davidescu, A., Davidescu, S. O., Dinca, L., & Cacovean, H. (2020). Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*, 184, 109330. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>
- Mohammadinia, L., Ahmadi Marzaleh, M., & Peyravi, M. R. (2021). Report of field assessment in the flooded areas of Iran, 2019. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*, 6(2), 73–78. <http://doi.org/10.32598/hdq.6.2.190.1>
- 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. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Paranjothy, S., Gallacher, J., Amlôt, R., Rubin, G. J., Page, L., Baxter, T., & Palmer, S. R. (2011). Psychosocial impact of the summer 2007 floods in England. *BMC Public Health*, 11, 145. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-11-145>
- Petroselli, A., & Grimaldi, S. (2018). Design hydrograph estimation in small and fully ungauged basins: A preliminary assessment of the EBA4SUB framework. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S197–S210. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12193>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000–1017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- Rufino, P. R., Gücker, B., Faramarzi, M., Boëchat, I. G., Cardozo, F. d. S., Santos, P. R., Zanin, G. D., Mataveli, G., & Pereira, G. (2023). Evaluation of the SWAT model for the simulation of flow and water balance based on orbital data in a poorly monitored basin in the Brazilian Amazon. *Geographies*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/geographies3010001>
- Samadi, A., Sadrolashrafi S. S., & Kholghi M. K. (2019). Development and testing of a

- rainfall-runoff model for flood simulation in dry mountain catchments: A case study for the Dez River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 109, 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.003>
- Sanders, R., & Tabuchi, S. (2000). Decision support system for flood risk analysis for River Thames, United Kingdom. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(10), 1185–1193.
- Sanderson, D., & Sharma, A. (2016). *IFRC World Disasters Report: Resilience – Saving lives today, investing for tomorrow. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC)*.
- Sharma, A., Mehan, S., McDaniel, R., Arnold, J., Trooien, T., Sammons, N., & Amegbletor, L. (2024). Assessing SWAT+ performance in simulating drainage water management and parameter transferability for watershed-scale applications. *Journal of Hydrology*, 637, 131338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131338>
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Coppola, E., Tomassetti, B., Verdecchia, M., & Visconti, G. (Eds.). (2008). *Hydrological modelling and the water cycle: coupling the atmospheric and hydrological models* (Vol. 63). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Yang, X., & Haywood, J. (2020). A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 143, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Tigabu, T. B., Visser, A., Kadir, T., Abudu, S., Cameron-Smith, P., & Dahlke, H. E. (2024). Optimization of the SWAT+ model to adequately predict different segments of a managed streamflow hydrograph. *Hydrological Sciences Journal*, 69(9), 1198–1217. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2364714>
- Tudose, N. C., Marin, M., Cheval, S., Ungurean, C., Davidescu, S. O., Tudose, O. N., Mihalache, A. L., & Davidescu, A. A. (2021). SWAT model adaptability to a small mountainous forested watershed in Central Romania. *Forests*, 12, 860. <https://doi.org/10.3390/f12070860>
- Van Tol, J., Bieger, K., & Arnold, J. G. (2021). A hydro-pedological approach to simulate streamflow and soil water contents with SWAT+. *Hydrological Processes*, 35(6), e14242. <https://doi.org/10.1002/hyp.14242>
- Wagner, P. D., Bieger, K., Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2022). Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+. *Hydrological Processes*, 36, e14589. <https://doi.org/10.1002/hyp.14589>
- Wondim, Y. K. (2016). Flood hazard and risk assessment using GIS and remote sensing in Lower Awash Sub-basin, Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(9), 69–86. <https://iiste.org/Journals/index.php/JEES/article/view/32924>
- Yen, H., Park, S., Arnold, J.G., Srinivasan, R., Chawanda, C.J., Wang, R., Feng, Q., Wu, J., Miao, C., Bieger, K., & Daggupati, P. (2019). IPEAT+: A built-in optimization and automatic calibration tool of SWAT+. *Water*, 11(8), 1681. <https://doi.org/10.3390/w11081681>