

Application of the SWAT Model in Monthly Runoff Simulation of the Merg River in the Mahidasht Plain, Kermanshah Province

Shahram Gorgani¹ , Maryam Hafezparast Mavaddat^{2✉} , Saadi Fathi³

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: shahram_gorgani@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.hafezparast@razi.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: sfathi79@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received

Received in revised form

Accepted

Available online

Keywords:

Validation,
Coefficient
of Determination (R^2),
Nash-Sutcliffe
Efficiency (NSE),
Calibration,
SWAT

ABSTRACT

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a continuous-time, semi-distributed model with GIS connectivity. This model can simulate hydrological processes in watersheds on a monthly basis using various data, including physical and meteorological data. In this study, the SWAT hydrological model was used to simulate runoff at the Khersabad hydrometric station on the Merg River over a 33-year statistical period (1990-2022). The first five-year period (1990-1995) was used for model warm-up, the next ten years (1995-2014) for calibration, and the final eight years (2015-2022) for model validation. The model was prepared using the SWAT-CUP optimization software and 16 different parameters. In the calibration phase, the coefficient of determination for monthly flow simulation was 0.61, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient was 0.61. In the validation phase, these values were estimated to be 0.77 and 0.78, respectively. Furthermore, in the validation phase, runoff volume and peak discharge were also evaluated, and relatively acceptable results were obtained compared to observed data for predicting these parameters in the mentioned period. Evaluations show that obtaining acceptable results from the SWAT model requires a large amount of information and accurate observational data. Considering that the studied river has been dry most of the time, especially in recent years, it can be said that the SWAT model has a relatively good ability to accurately simulate hydrological processes if complete data and information are available.

Cite this article: Gorgani, Shahram., Hafezparast Mavaddat, Maryam., & Fathi, Saadi. (2025). Application of the SWAT Model in Monthly Runoff Simulation of the Merg River in the Mahidasht Plain, Kermanshah Province. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1), 20-35. DOI: 10.22126/amcen.2025.11902.1038



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11902.1038

Publisher: Razi University

Introduction

People around the world are facing water scarcity and stress due to various factors. Efforts are being made around the world to manage water resources effectively. This includes educating the public about proper water use and the non-renewable nature of water resources. The SWAT model, a hydrological tool, has been significantly enhanced since 2019, improving its accuracy and applicability in water resource management and hydrological simulations. Thanks to these improvements, SWAT can better predict the effects of climate change, land use changes and water management measures.

Recent studies show that SWAT can effectively simulate the effects of climate change on water resources and the water balance in different regions. SWAT, which has traditionally been used in rural areas, is now also being applied in urban and semi-urban areas, particularly to predict urban runoff and surface water quality. In arid and semi-arid regions, SWAT is crucial for managing water balances and predicting water flows. It is also widely used for simulating water pollution from agricultural and industrial activities. The integration of SWAT with other models increases its usefulness in simulating complex water conditions on a global or regional scale. In addition, SWAT helps with flood forecasting and management, especially when combined with remote sensing data. Overall, SWAT has become a powerful tool for water resource managers to optimize water allocation and predict water crises under complex conditions such as climate change and urban development.

Method

A statistical period of 33 years from 1990 to 2022 was used in this study. The first five years were used for warm-up, the next 20 years for calibration and the last 8 years for model validation. These data include discharge data in the Khersabad hydrometric station area of the Merg River from the Mahidasht plain of Kermanshah province as well as daily temperature, precipitation and other meteorological information from selected meteorological and synoptic stations in the studied catchment area.

Results

After an initial model run with 500 iterations in the SWAT-CUP software, using the SUFI2 optimization algorithm, 16 hydrological parameters were used for model calibration, taking into account the slope and land use characteristics of the catchment area. The simulation results of the monthly discharge of the Merg River were obtained. These results pertain to the Mahidasht plain of Kermanshah province. Based on the optimal parameters and statistical criteria used in this SWAT model, in the calibration phase for monthly discharge data from 1995 to 2014, the Nash-Sutcliffe efficiency (NS) and coefficient of determination (R²) were both calculated as 0.61. In the validation phase from 2015 to 2022, they were 0.77 and 0.78, respectively.

Conclusions

In this study, the SWAT model was used to simulate monthly runoff in the upstream area of the Khersabad hydrometric station on the Merg River. The statistical period used in this

research was a thirty-three-year period from 1990 to 2022 . In the calibration phase, an NS coefficient of 0.61 and an R^2 of 0.61 were calculated. In the validation phase, the statistical coefficients NS and R^2 were calculated as 0.77 and 0.78 respectively.

The coefficients obtained for both indices during the calibration and validation periods show that the SWAT hydrological model achieves quite good results in simulating the monthly runoff in the upper reaches of the Khersabad hydrometric station. These results demonstrate the success of the SWAT hydrological model in simulating monthly runoff, even under conditions where many months of the simulation period were dry.

This success is due to the appropriate choice of parameters and the adaptation of the model to the specific hydrological characteristics of the catchment. Overall, this study provides similar results to other studies, including the work of Ebrahimi et al. (2019), which demonstrates the outstanding capabilities of the SWAT model in simulating hydrological processes.

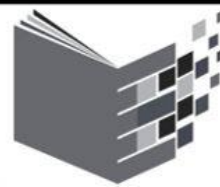
To further utilise the SWAT model, it is suggested that new parameters be considered in future studies and that the model be updated to increase simulation accuracy. The effects of climate change and changes in land use should also be further investigated.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



کاربرد مدل SWAT در شبیه سازی رواناب ماهانه، رودخانه مرگ دشت ماهیدشت استان کرمانشاه

شهرام گرگانی^۱، مریم حافظ پرست^۲، سعدی فتحی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: shahram_gorgani@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

رایانامه: m.hafezparast@razi.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: sfathi79@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدل ارزیابی خاک و آب ^۱ یک مدل پیوسته و نیمه توزیعی است که قابلیت اتصال به سیستم اطلاعات جغرافیایی ^۲ را دارد. این مدل با استفاده از اطلاعات متنوعی مانند داده های فیزیکی و هواشناسی می تواند فرآیندهای هیدرولوژیکی را در حوضه های آبریز به صورت ماهانه شبیه سازی کند. در این پژوهش، مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه سازی رواناب در ایستگاه هیدرومتری خرس آباد بر روی رودخانه مرگ در یک دوره آماری ۳۳ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۲) به کار گرفته شد. دوره پنج ساله نخست (۱۹۹۰-۱۹۹۵) برای گرم کردن مدل، ده سال بعدی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) برای واسنجی و هشت سال پایانی (۲۰۱۵-۲۰۲۲) برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. با بهره گیری از نرم افزار بهینه ساز SWAT-CUP و استفاده از ۱۶ پارامتر مختلف، مدل آماده سازی شد. در مرحله واسنجی، ضریب تعیین ^۳ شبیه سازی جریان ماهانه ۰.۶۱ و ضریب ناش ساتکلیف ^۴ ۰.۶۱ بود. در اعتبارسنجی، این مقادیر به ترتیب ۰.۷۷ و ۰.۷۸ برآورد گردید. افزون بر این، در مرحله اعتبارسنجی، حجم رواناب و دبی پیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج تقریباً قابل قبولی با توجه به داده های مشاهداتی برای پیش بینی این پارامترها در دوره مذکور به دست آمد. ارزیابی ها نشان می دهد که بدست آمدن نتایج قابل قبول از مدل SWAT مستلزم اطلاعات زیاد و داده های مشاهداتی دقیق می باشد و با توجه به اینکه اکثر مواقع به خصوص در سال های اخیر رودخانه مورد مطالعه خشک بوده تقریباً می توان گفت مدل SWAT توانایی نسبتاً خوبی برای شبیه سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی در صورت کامل بودن داده و اطلاعات دارد.
تاریخ دریافت:	
تاریخ بازنگری:	
تاریخ پذیرش:	
تاریخ انتشار:	
کلیدواژه ها: اعتبارسنجی، ضریب تعیین، ضریب ناش ساتکلیف، واسنجی، SWAT	

استناد: گرگانی، شهرام؛ حافظ پرست، مریم؛ فتحی، سعدی. (۱۴۰۴). کاربرد مدل SWAT در شبیه سازی رواناب ماهانه، رودخانه مرگ دشت ماهیدشت

استان کرمانشاه. مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۳۵-۲۰. DOI: 10.22126/amcen.2025.11902.1038



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی.

^۱ SWAT

^۲ GIS

^۳ R²

^۴ NS

۱. مقدمه

امروزه به دلایل مختلفی در نقاط بسیاری از جهان انسان‌ها با کمبود و تنش آبی مواجه هستند. در همین راستا تلاش‌های زیادی در کل دنیا برای مدیریت صحیح منابع آب صورت گرفته است. در رابطه با همین موضوع سعی بر آموزش الگوی مصرف صحیح در تمام بخش‌ها و افزایش سطح آگاهی آحاد جامعه از کمبود آب و تجدیدنپذیری منابع آب می‌باشد. از سال ۲۰۱۹، چندین پیشرفت قابل توجه در مدل SWAT صورت گرفته است که به دقت و کاربردهای وسیع‌تری در مدیریت منابع آب و شبیه‌سازی جریان‌های هیدرولوژیکی منجر شده است. یکی از این پیشرفت‌ها بهبود قابلیت‌های مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای مختلفی مانند تبخیر و تعرق^۵، انتقال مواد مغذی، و تغییرات کاربری اراضی بوده است. این بهبودها به مدل SWAT این امکان را داده‌اند که تأثیرات تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری زمین، و سیاست‌های مدیریت منابع آب را با دقت بیشتری پیش‌بینی کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که مدل SWAT می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات تغییرات اقلیمی را بر منابع آب و بیلان آبی مناطق مختلف شبیه‌سازی کند. به ویژه، مطالعاتی مانند تحقیق انجام شده توسط چن^۶ و همکاران (۲۰۲۰) به این نتیجه رسیدند که SWAT قادر است تأثیرات تغییرات اقلیمی و تغییر الگوهای بارش را بر جریان‌های رودخانه‌ها و ذخایر آب زیرزمینی شبیه‌سازی کند.

مدل SWAT به‌طور سنتی بیشتر در مناطق روستایی و حوضه‌های آبریز بزرگ استفاده می‌شده است، اما در سال‌های اخیر، تحقیقات نشان داده‌اند که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق شهری و نیمه شهری نیز کاربردی باشد. مطالعات ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که SWAT به‌ویژه در پیش‌بینی میزان رواناب شهری و کیفیت آب‌های سطحی در مناطق با توسعه سریع، بسیار مؤثر است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آبی مواجه هستند، مدل SWAT ابزار مهمی برای مدیریت بیلان آبی و پیش‌بینی جریان‌ها محسوب می‌شود. تحقیقات جدید به ویژه در مناطق جنوب آسیا و آفریقا نشان داده‌اند که مدل SWAT می‌تواند به سیاست‌گذاران

کمک کند تا منابع آب را به‌طور بهینه تخصیص دهند و از خشکسالی‌های احتمالی جلوگیری کنند. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای توسط سالم^۸ و همکاران (۲۰۲۱) در پاکستان نشان دادند که استفاده از مدل SWAT در مناطق خشک می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب و تخصیص بهینه آن‌ها مؤثر باشد. مدل SWAT به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی آلودگی منابع آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی استفاده می‌شود. از سال ۲۰۱۹، پژوهشگران مدل‌های جدیدتری از SWAT توسعه داده‌اند که قابلیت شبیه‌سازی آلودگی‌های پیچیده‌تری مانند آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را نیز دارند. این پیشرفت‌ها به مدیران منابع آب کمک می‌کنند تا تأثیر آلودگی‌های مختلف را بر اکوسیستم‌های آبی و سلامت عمومی بهتر پیش‌بینی کنند. یکی دیگر از دستاوردهای مهم، استفاده از مدل SWAT در مقیاس‌های بزرگ‌تر و ترکیب آن با دیگر مدل‌ها (مانند مدل‌های اقلیمی یا اقتصادی) برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب بوده است. این ترکیب‌ها باعث می‌شود که SWAT بتواند در شبیه‌سازی شرایط مختلف بیلان آبی در سطح جهانی یا منطقه‌ای کاربردی‌تر باشد. تحقیقات لی یو^۹ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده است که ترکیب SWAT با مدل‌های دیگر می‌تواند به شبیه‌سازی بهتری از جریان آب در شرایط نوسانات شدید اقلیمی و اقتصادی کمک کند. از دیگر کاربردهای مدل SWAT می‌توان به استفاده از آن در پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها اشاره کرد. مدل SWAT به‌ویژه در ترکیب با داده‌های سنجش از دور^{۱۰} می‌تواند به شبیه‌سازی دقیق‌تری از میزان رولناب و خطر سیلاب در مناطق مختلف کمک کند. مطالعه کاظمی روشخاری و همکاران (۲۰۲۴) در پیش‌بینی تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر روی دبی حوضه آبریزرودخانه کشف رود (بخشی از حوضه آبریز قره قوم در شمال شرقی کشور) با استفاده از مدل SWAT که تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی به طور مستقیم بر الگوهای دبی رودخانه تأثیر می‌گذارند و لازم است که استراتژی‌های مدیریتی برای مقابله با این تغییرات و حفظ منابع آبی پایدار اتخاذ شود. مهدی دوست و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل SWAT و

^۸ Salam^۹ Liu^{۱۰} Remote sensing^۵ ET^۶ Chen^۷ Zhang

نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب بود، به طوری که مقادیر ضریب نش^{۱۱} و R^2 در دوره واسنجی به ترتیب معادل ۰.۷۸ و ۰.۸۲ و برای دوره اعتبارسنجی ۰.۹ و ۰.۹۱ محاسبه شد. آلبرت ناکاواسا^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل SWAT پیش‌بینی می‌کند که تولید رسوب در حوضه نیل تحت سناریوی SSP5-RCP8.5 تا ۶۱٪ افزایش خواهد یافت، و بهبودهایی مانند استفاده از نقشه دم^{۱۳} با وضوح بالا و کالیبراسیون تعادل جرم هیدرولوژیکی را شامل می‌شود. علوی و همکاران (۲۰۲۳) مطالعه مروری بر کاربردهای مدل SWAT در حوزه‌های آبخیز مدیریت‌های را انجام دادند و تحقیقات آن‌ها نشان داد که بخش اعظم مطالعات در یونان، ایتالیا و اسپانیا انجام شده‌اند، و چالش‌هایی همچون دسترسی به داده‌های دقیق و بهبود مدل‌سازی در مناطق کم‌داده را بررسی می‌کند. لوردس فیایکس^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۲) اثر روش‌های درونیایی مکانی (IDW, RBF, OK) بر دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان روزانه را بررسی کرده است و نشان می‌دهد که روش‌های RBF و OK در شرایط خشک و NN در شرایط مرطوب بهترین عملکرد را دارند. مختاری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از کالیبراسیون توسط الگوریتم SUFI-2 نشان دادند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه کرخه با ضرایب ناش^{۱۵} و R^2 بالای ۰.۷ عملکرد خوبی دارد و برای مدیریت منابع آب در این منطقه مناسب است.

امینی نژاد و همکاران (۲۰۲۲) به مقایسه عملکرد روش‌های واسنجی GLUE، PSO و SUFI-2 در مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه قره سو پرداخته و نشان دادند که SUFI-2 عملکرد دقیق‌تری دارد و پارامترهای CN2 و ALPHA_BF بیشترین حساسیت را دارا می‌باشند.

عباس پور و همکاران (۲۰۲۲) به معرفی R-SWAT به عنوان یک ابزار رابط گرافیکی تعاملی برای کالیبراسیون پارامترها، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت، و تجسم نتایج مدل SWAT پرداختند. این ابزار با ارائه قابلیت‌های جدید برای تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی، به کاربران کمک می‌کند تا رفتار مدل را بهتر درک کنند و تحقیقات هیدرولوژیکی را بهبود بخشند.

الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT-CUP، مقدار تغذیه آب زیرزمینی در محدوده آستانه-کوچصفهان را برآورد کردند. نتایج نشان داد که مدل SWAT با در نظر گرفتن عوامل مختلف همچون اثر سد، کانال‌ها، خصوصیات خاک، کاربری اراضی و اطلاعات اقلیمی، داده‌های قابل اطمینانی از تغذیه آب زیرزمینی ارائه می‌دهد که در مدل‌های آب زیرزمینی، باعث بهبود دقت و قابل اطمینان‌تر شدن نتایج می‌شود. به‌طور کلی، مدل SWAT به‌عنوان یکی از مدل‌های برجسته در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب، طی سال‌های اخیر تحولات زیادی را تجربه کرده است. این مدل با استفاده از داده‌های مختلف و با بهبود عملکرد در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و آلودگی، می‌تواند در حل چالش‌های آب و هوا و مدیریت بهینه منابع آبی در شرایط پیچیده‌تری همچون تغییرات اقلیمی و توسعه شهری موثر باشد. این پیشرفت‌ها، SWAT را به ابزاری قدرتمندتر برای تصمیم‌گیرندگان در زمینه مدیریت منابع آب، تخصیص بهینه و پیش‌بینی بحران‌های آبی تبدیل کرده است. فرآیند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرآیند واسنجی بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین و پژوهشگران نیز از اهمیت اساسی برخوردار است. (گودرزی و حبیبی، ۲۰۱۹) گذشته تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد در حالی که شیوه‌های کاربری زمین (به‌ویژه چراگاه دام‌ها) تأثیر منفی بر کیفیت آب سطحی و زیرزمینی گذاشته‌اند.

۲. پیشینه تحقیق

شاهویی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب خروجی در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری سننه در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در استان کردستان در ایران با مساحت ۵۳۰۶ کیلومتر مربع نمودند. شبیه‌سازی رواناب در یک دوره آماری هفت ساله ۲۰۱۳-۲۰۰۷ انجام شد. با توجه به هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه، شاخص‌های آماری محاسبه شده مدل SWAT در دوره واسنجی و هم در دوره اعتبارسنجی در مقیاس زمانی ماهانه دارای

¹⁴ Micah Lourdes Felix

¹⁵ NS

¹¹ Nash-Sutcliffe

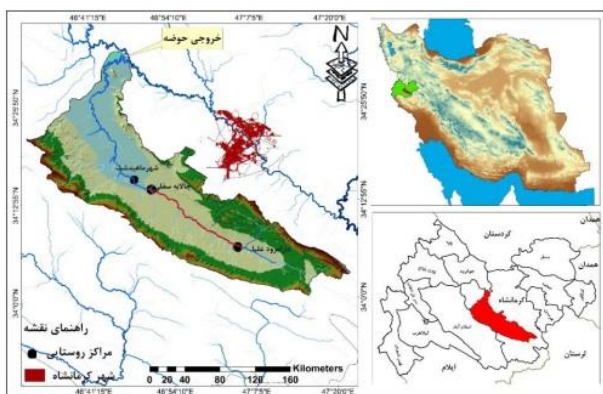
¹² Albert Nkwasa

¹³ DEM

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳. منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در دشت ماهیدشت با وسعت حدود ۱۵۲/۵ کیلومترمربع در جنوب غربی استان کرمانشاه واقع شده که از مرزهای شرقی به خط الرأس کوه سفید و کوه سرچکان، از جنوب به ارتفاعات کوه نثار، از شمال و غرب به شهر ماهیدشت و تپه ماهورهای کم ارتفاع آن در ناحیه‌ای بین عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}58'32''$ و $34^{\circ}59'11''$ و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ}36'2''$ و $46^{\circ}58'32''$ شرقی محدود می‌گردد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

رودخانه مرگ، که به کردی به نام مرگ شناخته می‌شود، یکی از رودخانه‌های مهم استان کرمانشاه در غرب ایران است. این رودخانه از سراب فیروزآباد در جنوب غربی کرمانشاه سرچشمه می‌گیرد و در نهایت به رودخانه قره‌سو می‌ریزد. این رودخانه به دلیل ویژگی‌های خاص خود، از جمله جریان سریع و ناپایدار، شهرت زیادی پیدا کرده است و در بین مردم محلی و گردشگران به عنوان یک مکان خطرناک شناخته می‌شود. رودخانه مرگ در محیطی طبیعی و زیبا در منطقه ماهیدشت قرار دارد. اطراف این رودخانه پوشش گیاهی غنی، کوه‌های سرسبز و چشم‌اندازهای بکر وجود دارد که به این مکان جذابیت بیشتری می‌بخشد. اما مهم‌ترین ویژگی این رودخانه، جریان شدید و تغییرات فصلی آب آن است. در فصل‌های بارانی، آب این رودخانه به

عباس پور و همکاران (۲۰۲۲) به نقد معیار “بهترین شبیه‌سازی” در مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT می‌پردازد که استدلال کردند استفاده از این روش بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت خروجی مدل، می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای به همراه داشته باشد و معیارهایی مانند ناش^{۱۶}، R^2 ممکن است تنها دقت را نشان دهند. اما از لحاظ عدم قطعیت اطلاعاتی ارائه نمی‌کنند. همچنین معیارهای عدم قطعیت مانند P-factor و R-factor که سطح دقت و عدم قطعیت را همراه با یکدیگر در نظر می‌گیرند، برای ارزیابی اعتبار مدل مناسب‌ترند. در نهایت تأکید کردند که “بهترین شبیه‌سازی” معیار مناسبی برای کالیبراسیون نیست و روش‌هایی مبتنی بر تحلیل عدم قطعیت باید اتخاذ شوند.

مدل SWAT ابزاری قدرتمند و منعطف برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و بررسی سناریوهای مدیریتی و اقلیمی است. با این حال، موفقیت آن وابسته به کیفیت داده‌ها، انتخاب روش مناسب کالیبراسیون، تحلیل حساسیت و توجه به عدم قطعیت نتایج است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از معیارهای دقت و عدم قطعیت و بهره‌گیری از ابزارهای نوین می‌تواند اعتبار و کاربردپذیری نتایج مدل را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

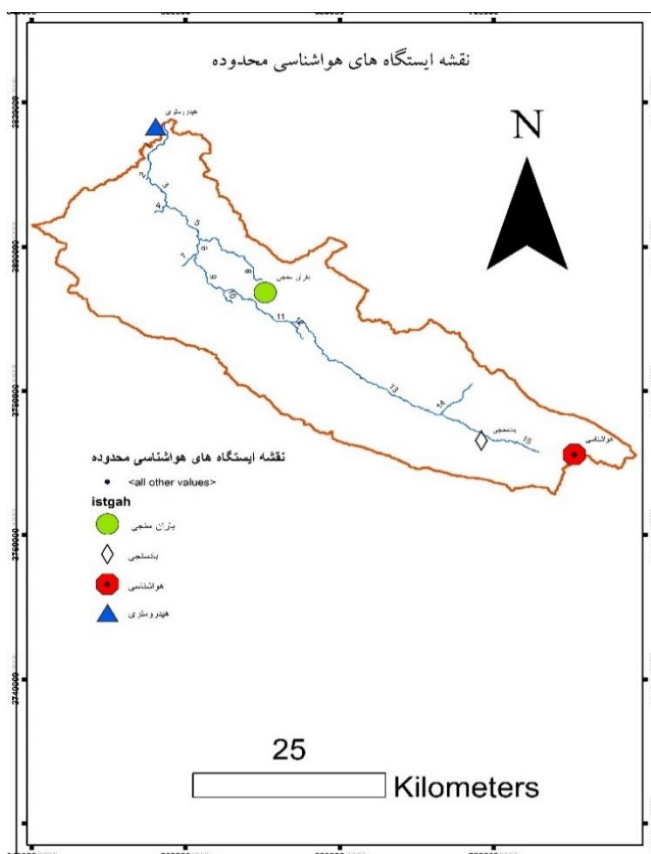
در این تحقیق برخلاف بسیاری از پژوهش‌ها که صرفاً به شاخص‌های آماری مانند ناش و R^2 بسنده می‌کنند، به‌طور همزمان از شاخص‌های عدم قطعیت (p-factor) و (r-factor) نیز برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد. این رویکرد تحلیلی، ارزیابی جامع‌تری از اعتبار مدل ارائه می‌دهد و در تصمیم‌گیری مدیریتی کاربردی‌تر است. همچنین علاوه بر شناسایی پارامترهای حساس مدل با استفاده از آنالیز حساسیت، تأثیر حذف این پارامترها نیز به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفت. این کار به وضوح اهمیت و وزن هر پارامتر را در نتایج مدل نشان داد و اثبات کرد که حذف پارامترهای کلیدی می‌تواند دقت مدل را به شدت کاهش دهد. این سطح از تحلیل در بسیاری از مطالعات مشابه کمتر دیده می‌شود.

در حالی که بسیاری از مطالعات SWAT در حوزه‌های مرطوب انجام می‌شوند، در این تحقیق مدل درحوزه‌ای عمدتاً خشک و با داده‌های کم و پراکنده اجرا و نتایج با شرایط واقعی منطقه تطبیق داده شد.

محدوده ایستگاه هیدرومتری خرس آباد رودخانه مرگ دشت ماهیدشت استان کرمانشاه و همچنین داده‌های درجه حرارت، بارندگی و سایر اطلاعات هواشناسی روزانه و ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیک انتخابی در حوضه مورد بررسی می‌باشد. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است. و موقعیت آن‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

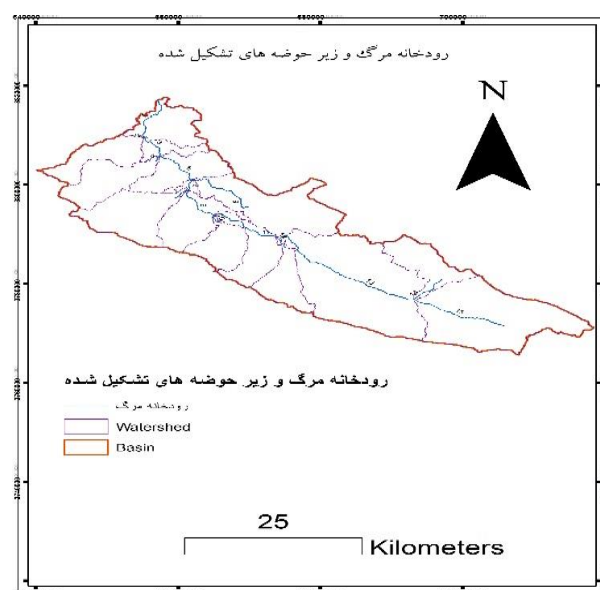
جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
کرمانشاه	باران سنجی	۳۴.۲۷	۴۶.۸۵	۱۳۲۰
کرمانشاه	هواشناسی	۳۴.۰۶	۴۷.۲۸	۱۳۲۰
خرس آباد	هیدرومتری	۳۴.۴۸	۴۶.۷۳	۱۳۲۰
کرمانشاه	باد سنجی	۳۴.۰۸	۴۷.۱۵	۱۳۲۰



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری محدوده

شدت افزایش می‌یابد و جریان آن بسیار قوی‌تر می‌شود، که می‌تواند خطرناک باشد. در این شرایط، تردد در نزدیکی رودخانه یا در مسیر آن می‌تواند بسیار سخت و پرخطر باشد. در سال‌های اخیر، به دلیل کاهش بارندگی‌ها و بحران‌های آبی در ایران، وضعیت این رودخانه تغییرات زیادی کرده است. این رودخانه که پیش‌تر یک رودخانه چهارفصل بود، اکنون در فصل‌های گرم سال، به ویژه در تابستان و اوایل پاییز، به شدت خشک می‌شود. این تغییرات ناشی از کاهش سطح آب رودخانه و تغییرات اقلیمی است. بسیاری از بخش‌های رودخانه در این فصول به طور کامل خشک می‌شوند و فقط در اواخر پاییز و زمستان آب دارند. بحران آبی که رودخانه مرگ با آن روبه‌رو است، نه تنها بر اکوسیستم منطقه تأثیر منفی گذاشته، بلکه زندگی مردم محلی و کشاورزان را نیز تحت تأثیر قرار داده است. کاهش منابع آب در این منطقه باعث شده که بسیاری از اراضی به روش دیم کشت شوند و کشاورزان با مشکل تأمین آب در فصول مختلف مواجه شوند.



شکل ۲. رودخانه مرگ و زیر حوضه‌های تشکیل شده آن در مدل SWAT

در این مطالعه از یک دوره آماری ۳۳ ساله از سال ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۲ استفاده شد. پنج سال ابتدایی آن برای گرم کردن، ۲۰ سال بعد برای کالیبراسیون و ۸ سال انتهایی آن برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. این داده‌ها شامل داده‌های دبی خروجی در

۴. روش‌شناسی پژوهش

۱.۴. مدل SWAT

این مدل فیزیکی و نیمه توزیعی به وسیله سازمان تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا برای ارزیابی فعالیت‌های مدیریت اراضی و تاثیر اقلیم بر جریان آب، مواد مغذی، جابجایی میزان رسوبات و همچنین تعادل بین مواد شیمیایی در حوضه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با نوع خاک و کاربری‌های اراضی و انواع مختلف شرایط مدیریتی در بازه‌های زمانی روزانه توسعه یافته است. این مدل همچنین در حوضه‌هایی با داده‌های ناقص و نامنظم نیز قابل استفاده می‌باشد، نرم افزار ArcSwat که یک رابط گرافیکی برای مدل SWAT می‌باشد، به عنوان یک نرم افزار کمکی توانایی اجرا شدن در نرم افزار ArcMap، که از سری نرم افزارهای GIS می‌باشد را دارد. در واقع هنگام کار با مدل ArcSwat برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی تمام مراحل انجام کار در محیط نرم افزار ArcMap انجام خواهد شد [۱۵].

شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل SWAT با دو روش زیر می‌تواند صورت گیرد:

۱- گرین آمپت: در این روش با استفاده از محاسبات رواناب، داده‌های بارش و هدایت هیدرولیکی مقدار رواناب محاسبه می‌شود. برای تعیین رواناب سطحی در SWAT از روش گرین و آمپت و لارسون و مین استفاده شده است. میزان نفوذپذیری از روش لارسون مین و گرین آمپت به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$F_{inft} = k_e \times \left(1 + \frac{\varphi_{\omega f} + \Delta\theta_{\gamma}}{F} \right) \quad (1)$$

که در آن، F_{inft} مقدار نفوذپذیری در واحد زمان (بر حسب میلی‌متر بر ساعت)، k_e هدایت هیدرولیکی مؤثر (بر حسب میلی‌متر بر ساعت)، $\varphi_{\omega f}$ پتانسیل ماتریک جبهه رطوبتی (بر حسب میلی‌متر)، $\Delta\theta_{\gamma}$ تغییرات رطوبت حجمی (بر حسب میلی‌متر) و F نفوذپذیری تجمعی در زمان (بر حسب میلی‌متر) (راهنمای مدل SWAT).

۲- منحنی SCS: در این روش شماره منحنی خاک و مقدار نفوذ آب نقش اساسی دارند. این روش یک مدل تجربی است که در سال ۱۹۵۰ به وسیله سازمان حفاظت آب و خاک آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. این معادله به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2)$$

که در آن، Q_{surf} ارتفاع رواناب (بر حسب میلی‌متر) R_{day} ارتفاع بارندگی روزانه (بر حسب میلی‌متر) و S پارامتر نگهداشت از نظر مکانیکی به علت تغییرات در خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و از نظر زمانی به علت تغییر در مقدار آب و خاک در واحدهای مختلف متغیر می‌باشد و از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$S = 25.4 \left[\left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \right] \quad (3)$$

که در آن، CN شماره منحنی است که از جداول تهیه شده به منظور تعیین میزان CN به دست می‌آید. چرخه هیدرولوژی از طریق SWAT بر اساس رابطه موازنه آبی شبیه‌سازی شده است.

$$SW_t = SW_Q + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

که در آن، SW_t حجم نهایی آب در خاک (بر حسب میلی -متر آب)، SW_0 حجم اولیه آب در خاک در روز (بر حسب میلی -متر آب)، R_{day} مقدار بارندگی روزانه (بر حسب میلی‌متر آب)، Q_{surf} میزان رواناب سطحی روزانه (بر حسب میلی‌متر آب)، E_a میزان تبخیر و تعرق روزانه (بر حسب میلی‌متر)، W_{seep} میزان آب ورودی از نواحی اطراف به پروفیل خاک (بر حسب میلی‌متر آب) و Q_{gw} مقدار تراوش بازگشتی روزانه آب (بر حسب میلی‌متر آب) می‌باشد. مدل SWAT یک مدل پیوسته است یعنی خروجی یک معادله، ورودی معادله دیگر است. با توجه به ورودی‌های داده شده به مدل (مشخات خاک، کاربری، مدل رقومی ارتفاع و اطلاعات هواشناسی) مقدار پارامترهای تبخیر روزانه، آب ورودی از نواحی اطراف پروفیل، مقدار تراوش بازگشتی روزانه، مقدار رطوبت خاک و غیره محاسبه می‌شود و در نهایت مقدار رواناب خروجی از حوزه آبخیز مشخص می‌شود [۱۵]. برای ارزیابی کارایی مدل و برای بدست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به سمت جواب یگانه، گاهی لازم است چندین روش آماری مورد

پارامترهای بهینه در مرحله واسنجی، اقدام به اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری پایین دست رودخانه مرگ شد.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

ردیف	پارامتر	شرح پارامتر	مقدار مینیمم	مقدار ماکزیمم	مقدار بهینه
۱	R_CN2.mgt	شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II)	-۰.۳	۰	-۰.۱۱
۲	V_ALPH A_BF.gw	ضریب α آب زیر زمینی (یک پارامتر تجربی مرتبط با تأخیر جریان پایه در سطح آب زیرزمینی)	۰.۵	۱	۰.۸۳
۳	V_GW_ DELAY.g w	زمان تأخیر انتقال آب زیر زمینی (day)	۵۵	۱۲۵	۷۲
۴	V_GWQ MN.gw	حداقل مقدار ذخیره آب در سفره که برای رخ دادن جریان پایه لازم است (mm H2O)	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۲۴۵۵
۵	V_SLSU BBSN.hru	طول شیب دامنه (متوسط فاصله‌ای که جریان رواناب قبل از ورود به جریان اصلی طی می‌کند)	۱۰	۴۵	۱۴.۲۳
۶	V_GW_ REVAP.g w	ضریب تعیین نفوذ به سفره آب زیر زمینی عمیق یا صعود موئنیگی از سفره آب کم عمق	۰.۱۲	۰.۲	۰.۱۲
۷	V_ESCO .hru	ضریب تبخیر خاک	۰.۷	۱	۰.۷۷
۸	V_CH_N 2.rte	ضریب زبری مانینگ رودخانه اصلی	۰.۰۵	۰.۱۵	۰.۱۳
۹	V_CH_K 2.rte	قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر	۵	۴۰	۲۱.۶۲

استفاده قرار گیرد. در این پژوهش ارزیابی مدل به کمک ضریب ناش-ساتکلیف^{۱۷} و ضریب همبستگی (تبیین) (R^2) انجام می‌گیرد.

ضریب همبستگی (R^2): نشاندهنده قسمتی از تغییرات کل یا واریانس کل مقادیر مشاهده‌ای است که به وسیله مقادیر شبیه سازی شده توجیه می‌شود. آماره R^2 نسبت پراکندگی بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. ضریب R^2 بین صفر تا یک متغیر است، چنانچه مقادیر پیش بینی شده و اندازه‌گیری شده برابر باشند، مقدار آن برابر با یک است.

$$(5) \quad \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O و P_i مقادیر متناظر مشاهده و پیش بینی شده $\bar{O}$ و $\bar{P}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش بینی شده است. میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش بینی شده است. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش بینی و مشاهده شده تا چه میزان به بیشینه مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند. [15]

ضریب ناش^{۱۸}: ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. محققین مختلف از این شاخص برای ارزیابی مدل‌ها استفاده کرده‌اند. این ضریب به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$(6) \quad \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right]$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده و پیش بینی شده و $\bar{O}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش بینی شده است.

واسنجی و اعتبار سنجی به ترتیب برای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ انتخاب شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی در این تحقیق از ۱۶ پارامتر مختلف استفاده شد که اسامی و مشخصات مربوط به آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است. بعد از به دست آوردن

۵. یافته‌های پژوهش

با توجه به نقشه رقوم ارتفاعی (DEM) (شکل ۴) منطقه مورد مطالعه بیشترین و کمترین ارتفاع به ترتیب ۱۳۰۹ و ۲۷۶۹ متر می‌باشد [۱].



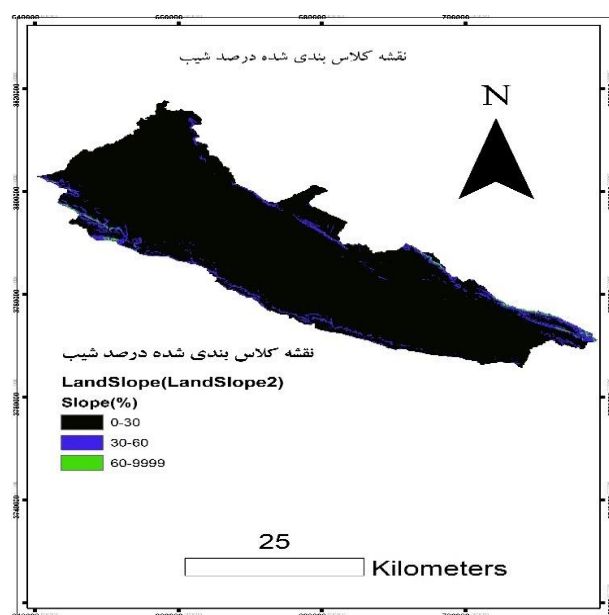
شکل ۴. نقشه رقوم ارتفاعی (DEM)

همچنین نقشه‌های خاک منطقه و کاربری اراضی و درصد شیب منطقه نیز تهیه شد. در مدل SWAT ابتدا از روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی، حوضه آبخیز اصلی به ۱۵ زیر حوضه تقسیم می‌شود. سپس با ترکیب نقشه‌های رقوم ارتفاعی (DEM) (شکل ۴)، کلاس‌بندی خاک (شکل ۵)، طبقه‌بندی شیب (شکل ۶) و کاربری اراضی (شکل ۷)، کل زیر حوضه‌ها نیز به ۸۳ واحد کوچکتری تقسیم می‌شوند که به هر کدام از این واحدها یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) گفته می‌شود. زیر حوضه‌ها و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) محدوده دشت در شکل (۸) نشان داده شده است.

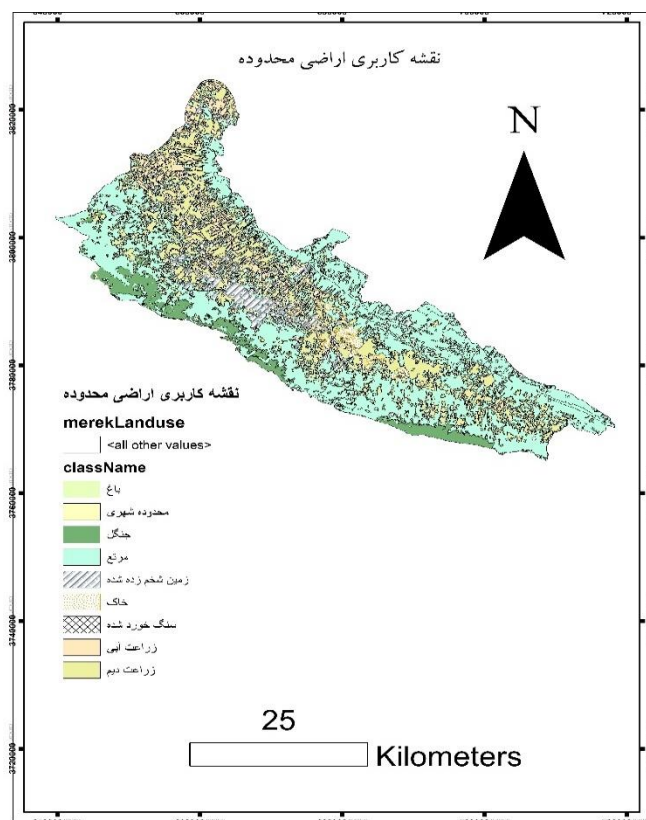
بعد از تهیه نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک، داده‌های هواشناسی به مدل معرفی شدند و با در نظر گرفتن مختصات جغرافیایی ایستگاه هیدرومتری خرس آباد، زیر حوضه شماره ۱ به عنوان خروجی حوضه در نظر گرفته شد. بعد از ساختن جدول (۲) و وارد کردن داده‌ها و اطلاعات مربوطه به مدل، اجرای آن به صورت ماهانه صورت گرفت. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از نرم افزار (SWAT cup) و الگوریتم SUFI۲ استفاده شد. برنامه SUFI۲ واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب کرده و سعی می‌کند پارامترهای عدم قطعیت را به نحوی

ادامه جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

ردیف	پارامتر	شرح پارامتر	مقدار مینیمم	مقدار ماکزیمم	مقدار بهینه
۱۰	R_SOL_B D (1).sol	جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک (gcm^{-3})	-۰.۳	۰.۱	-۰.۰۱
۱۱	R_SOL_A WC(1).sol	ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک ($\text{mmH}_2/\text{mmSoi}$) (l)	۰	۰.۳	۰.۱
۱۲	V _ALPHA_ BNK.rte	ضریب آلفای جریان پایه در بستر رودخانه (تنظیم‌کن نده تبادل آب بین بستر و جریان رودخانه)	۰.۵	۱	۰.۷۳
۱۳	r_SOL_K (1).sol	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک	-۰.۳	۰.۱	-۰.۲
۱۴	V_REVA PMN.gw	حداقل عمق آب زیرزمینی برای حرکت معکوس (مقدار آبی که باید در آبخوان زیرزمینی موجود باشد تا حرکت معکوس اتفاق بیفتد.)	۶۰	۱۳۰	۱۱۶.۶۲
۱۵	V_RCHR G_DP.gw	نسبت تغذیه عمیق (درصدی از آب نفوذی که به آبخوان عمیق می‌رسد.)	۰	۰.۵	۰.۱۳
۱۶	V_EPCO. hru	ضریب انتقال آب توسط گیاهان (توانایی گیاه در برداشت آب از اعماق مختلف خاک.)	۰.۷	۱	۰.۷۷



شکل ۶. نقشه درصد شیب محدوده



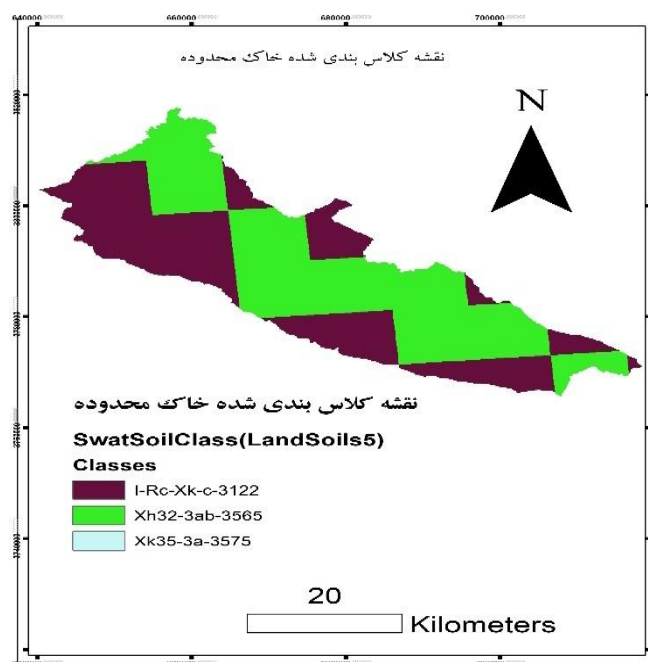
شکل ۷. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

تعیین کند که بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در ناحیه عدم قطعیت تعیین شده قرار گیرند.

در عین حال سعی می‌کند، کوچکترین طیف عدم قطعیت ممکن را ایجاد نماید. در این نرم افزار یک دامنه بزرگ اولیه عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا، داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ PPU قرار می‌گیرند [۱۵]، سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی، کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود:

۱- بیشتر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ PPU واقع شوند (حدنهایی (۱) $p\text{-factor} =$).

۲- فاصله متوسط بین حد بالا و پایین، در طیف ۹۵ درصد عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تا حد ممکن کوچک شود (حدنهایی (صفر) $r\text{-factor} =$).



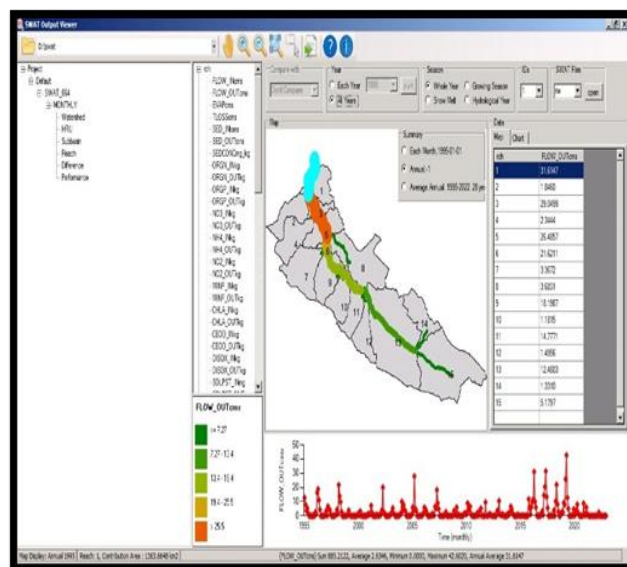
شکل ۵. نقشه کلاس بندی شده خاک محدوده مورد مطالعه

جدول ۳. خلاصه نتایج مدل در مرحله واسنجی

نام حوضه	طول دوره آماری	R ²	NS	MSE	r-factor	p-factor
مرگ ماهیدشت کرمانشاه	۱۹۹۵-۲۰۱۴	۰.۶۱	۰.۶۱	۱.۳	۱.۱۷	۰.۵۲

جدول ۴. خلاصه نتایج مدل در مرحله اعتبار سنجی

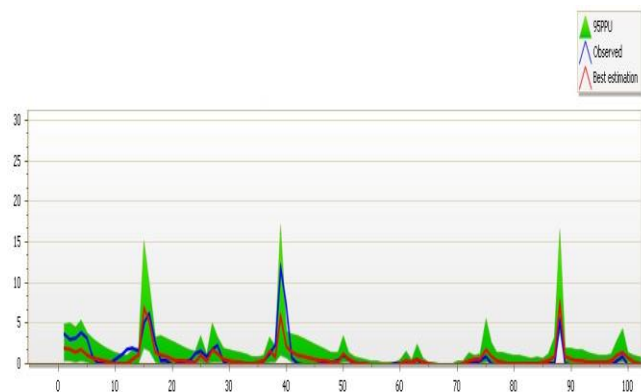
نام حوضه	طول دوره آماری	R ²	NS	MSE	r-factor	p-factor
مرگ ماهیدشت کرمانشاه	۲۰۲۲-۲۰۱۵	۰.۷۸	۰.۷۷	۱.۱	۱.۵۸	۰.۶۱



شکل ۸. شبکه رودخانه و موقعیت نقطه خروج و نحوه تقسیم زیر حوضه‌ها در منطقه مورد مطالعه

۶. بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پس از اجرای اولیه مدل با ۵۰۰ گام محاسباتی در نرم افزار - SWAT cup و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SUFI۲ و همچنین ۱۶ پارامتر هیدرولوژیکی مختلف یاد شده در جدول (۲) با توجه خصوصیات حوضه برای واسنجی مدل، نتایج شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه مرگ دشت ماهیدشت استان کرمانشاه برای دوره واسنجی و اعتبار سنجی بدست آمد. با توجه به پارامترهای بهینه و معیارهای آماری مورد استفاده در مدل SWAT برای این پژوهش در مرحله واسنجی برای داده‌های رواناب در مقیاس زمانی ماهانه برای سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۱۴ مقادیر شاخص‌های آماری ناش^{۱۹} و R² به ترتیب برابر ۰.۶۱ و ۰.۶۱ محاسبه شد. برای مرحله اعتبارسنجی سال‌های ۲۰۱۵ الی ۲۰۲۲ به ترتیب برابر ۰.۷۷ و ۰.۷۸ حاصل گردید. خروجی این مقادیر به همراه سایر پارامترها در جدول (۳) برای مرحله واسنجی و جدول (۴) برای مرحله اعتبار سنجی نشان داده شده است.



شکل ۹. نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ (مرحله واسنجی مدل)

در شکل (۹) محدوده سبز رنگ باند عدم قطعیت مدل، محدوده قرمز رنگ بهترین شبیه‌سازی و منحنی آبی رنگ داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق و قرار گرفتن ۵۲ درصد داده‌های مشاهداتی (p-value) در محدوده سبز رنگ (محدوده عدم قطعیت)، به صورتی که در جدول (۳) همراه سایر پارامترها آمده است، نشان از رضایت بخش بودن مدل دارد [۱۵] که این نتایج با تحقیق ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۹) در شبیه سازی رواناب حوضه آبخیز نکا مطابقت دارد. همانطور جدول ۴ خلاصه نتایج مدل در مرحله اعتبار سنجی را نشان می‌دهد نتایج حتی بهتر شده و علاوه بر بدست آمدن R² و ناش

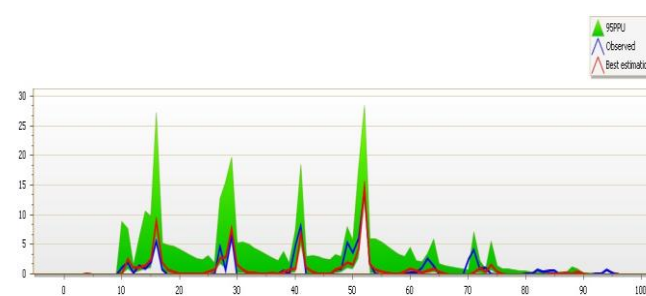
همانطور که از شکل (۱۱) مشخص هست، پارامترهای $V_RCHRG_DP.gw$ (نسبت تغذیه عمیق (درصدی از آب نفوذی که به آبخوان عمیق می‌رسد))، $R_CN2.mgt$ (شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II))، $V_ESCO.hru$ (ضریب انتقال آب توسط گیاهان (توانایی گیاه در برداشت آب از اعماق مختلف خاک))، $R_SOL_BD(1).sol$ (جرم مخصوص ظاهری لایه‌های خاک (gcm^{-3}))، $R_SOL_AWC(1).sol$ (ظرفیت رطوبت قابل استفاده لایه‌های خاک ($mmH_2/mmSoil$)) و $_ALPHA_BNK.rte$ (ضریب آلفای جریان پایه در بستر رودخانه (تنظیم‌کننده تبادل آب بین بستر و جریان رودخانه))، با توجه به اینکه مقدار p -value نزدیک به صفر و قدر مطلق t -stat بالایی دارند [۱۵]، جزء حساس‌ترین پارامترهای مدل در مرحله واسنجی هستند.

برای اینکه میزان تاثیرگذاری پارامترهای مذکور در مدل مورد ارزیابی قرار گیرد از تکنیک حذف این پارامترها استفاده شد. با حذف این پارامترها از مدل نتایج واسنجی مطابق جدول (۵) دستخوش تغییرات شد. به این صورت که ضرایب R^2 و NS به ترتیب به مقادیر ۰.۴۶ و ۰.۴۸ کاهش یافتند و ضریب MSE (میانگین مربعات خطا) بیشتر شد. r -factor (پهنای باند عدم قطعیت) نازک تر شد و مهمتر از همه p -factor (درصد داده‌های مشاهداتی قرار گرفته در باند عدم قطعیت) کمتر شد [۱۵]، یعنی فقط ۱۳ درصد از داده‌های مشاهداتی در بازه ۹۵ درصد عدم قطعیت قرار گرفتند و واسنجی بدتر شد این استدلال‌ها به وضوح در شکل (۱۲) نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ بعد از حذف پارامترهای حساس مدل نمایش داده شده است.

جدول ۵. خلاصه نتایج مدل در مرحله واسنجی بعد از حذف پارامترهای حساس

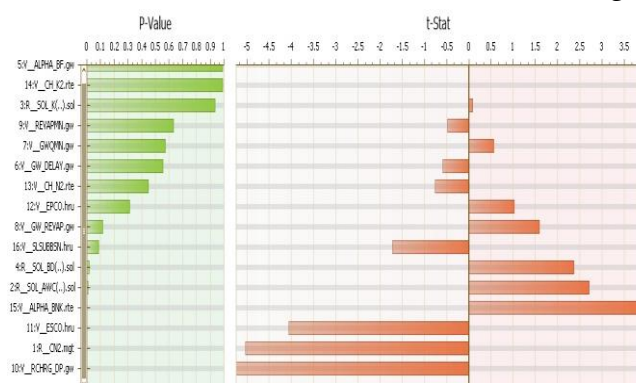
نام حوضه	طول دوره آماری	R^2	NS	MSE	r -factor	p -factor
مرگ ماهیدشت کرمانشاه	۲۰۱۴-۱۹۹۵	۰.۴۶	۰.۴۸	۱.۷	۰.۱۴	۰.۱۳

(NS) بالا (به ترتیب ۰.۷۸ و ۰.۷۷) درصد بسیار بیشتری از داده‌های مشاهداتی (۶۱ درصد) در محدوده عدم اطمینان قرار دارند که مجدداً تطابق بسیار خوبی را با نتایج Abbaspour و همکاران (۲۰۲۲) به طور واضح و شفاف در شکل شماره (۱۰) به تصویر می‌کشد. و تحت شرایطی این نتایج حاصل گردید که حوضه رودخانه مورد مطالعه (مرگ ماهیدشت) اکثر ماه‌های سال در طول دوره شبیه‌سازی خشک بوده و داده‌های مشاهداتی آن گواه این ماجرا می‌باشد. کالیبراسیون خوب مدل و انتخاب پارامترهای تاثیر گذار با توجه به خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه در این قضیه کاملاً تاثیر گذار می‌باشد.



شکل ۱۰. نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲ (مرحله اعتبار سنجی مدل)

برای تکمیل تحقیق انجام شده در محدوده مورد مطالعه آنالیز حساسیت پارامترهای مدل نیز در مراحل واسنجی صورت گرفت که نتایج آن به صورت گرافیکی از نرم افزار SWAT-CUP در شکل ۱۱ نشان داده شده است [۱۶].



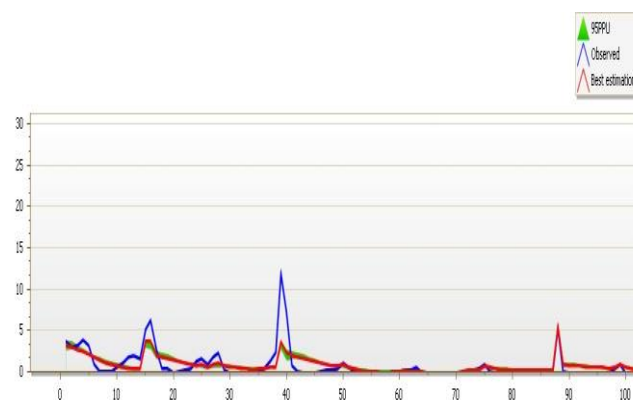
شکل ۱۱. آنالیز حساسیت مدل در مرحله واسنجی

به طور کلی، این تحقیق نتایج مشابه با یافته‌های دیگر پژوهش‌ها از جمله کارهای ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۹) ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده توانایی‌های برجسته مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی است.

برای بهره‌گیری بیشتر از مدل SWAT، پیشنهاد می‌شود که مطالعات آتی پارامترهای جدید را در نظر گرفته و مدل را برای دقت بیشتر شبیه‌سازی به‌روز کنند. همچنین، تأثیرات تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی باید بیشتر بررسی شوند.

References

- [1] Fatehi, Z., & Shahoei, S. V. (2020). Application of the SWAT Model in Simulating Monthly Runoff, Lake Urmia Watershed, Kurdistan Province, Iran. *Environmental and Water Engineering*, 6(3), 301-304. DOI: 10.22034/jewe.2020.218842.1346.
- [2] Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of SWAT model studies in Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 116799. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- [3] Nkwasa, A., Chawanda, C. J., & van Griensven, A. (2022). Regionalization of the SWAT+ model for projecting climate change impacts on sediment yield: An application in the Nile basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101152. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101152>
- [4] Felix, M. L., & Jung, K. (2022). Impacts of spatial interpolation methods on daily streamflow predictions with SWAT. *Water*, 14(20), 3340. <https://doi.org/10.3390/w14203340>
- [5] Moazenzadeh, R., Ghahraman, B., Arshad, S., & Davary, K. (2020). Simulation of runoff using SWAT model at annual scale (Case study: Neyshabour watershed). *Journal of Soil and Water Science*, 29(4), 57-70.
- [6] Mokhtari, F., Honarbakhsh, A., Soltani, S., Abdolahi, K., & Pajooesh, M. (2020). Evaluation of the SWAT hydrological model in simulating runoff in the Karkheh watershed. *Scientific-Research Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 9(27), 47-58. <https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.27.25>



شکل ۱۲. نمودار داده‌های شبیه سازی شده و مشاهداتی رواناب ماهانه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ (مرحله واسنجی مدل) بعد از حذف پارامترهای حساس مدل

۱.۶. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری خرس آباد در رودخانه مرگ شد. دوره آماری استفاده شده در این تحقیق یک دوره سی و سه ساله که از سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۲۲ استفاده شد. که ۵ سال اول این دوره ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ برای گرم کردن مدل، ده سال بعد از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ برای واسنجی مدل با استفاده از ۱۶ پارامتر مختلف و هشت سال انتهایی یعنی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی از دو شاخص آماری R^2 و ضریب NS استفاده شد که نتایج آن به صورت زیر قابل بیان است:

۱- در مرحله واسنجی ضریب NS برابر ۰.۶۱ و R^2 برابر ۰.۶۱ محاسبه شد.

۲- مرحله اعتبارسنجی ضریب آماری NS و R^2 به ترتیب برابر با ۰.۷۷ و ۰.۷۸ محاسبه شد.

۳- با توجه به ضرایب به دست آمده برای هر دو شاخص در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی مشخص شد که مدل هیدرولوژیکی SWAT دارای نتایج تقریباً خوبی در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در محدوده بالادست ایستگاه هیدرومتری خرس آباد می‌باشد. این نتایج موفقیت مدل هیدرولوژیکی SWAT را در شبیه‌سازی رواناب ماهانه نشان می‌دهند، حتی در شرایطی که بسیاری از ماه‌ها طی دوره شبیه‌سازی خشک بودند. این موفقیت به انتخاب متناسب پارامترها و تطابق مدل با ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاص حوضه مربوط می‌شود.

- [15] Abbaspour, K. C. (2022). The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling. *Environmental Modelling and Software*. DOI: 10.1002/essoar.10505802.1
- [16] Ebrahimi, P., Salimi Kouchi, J., & Mohseni Saravi, M. (2019). Calibration and validation of SWAT Model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(3), 266-279. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117332>
- [17] Iman Mehdidoost Roudbaneh, Somaye Janatrostami, Afshin Ashrafzadeh, Saman Javadi. 2023. Accuracy assessment of groundwater recharge estimation using SWAT and MODFLOW in paddy fields (Case study: Astane-Kouchsefahan aquifer). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(10), 1541-1564. 10.22059/ijswr.2023.363264.669547
- [7] Aminnejad, B., Ghafourian, S. B., & Ebrahimi, H. (2022). Evaluation of calibration characteristics of SWAT hydrological model in a mountainous watershed (Gharesou). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(6), 91–106. Retrieved from <https://civilica.com/doc/114230/>
- [8] Li, B., Tan, L., Zhang, X., Qi, J., Marek, G. W., Li, Y., Dong, X., Zhao, W., Chen, T., Feng, P., Liu, D. L., Srinivasan, R., & Chen, Y. (2023). Modeling streamflow response under changing environment using a modified SWAT model with enhanced representation of CO2 effects. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101547. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101547>
- [9] Chen, M., Gassman, P. W., Srinivasan, R., Cui, Y., & Arriitt, R. (2020). Analysis of alternative climate datasets and evapotranspiration methods for the Upper Mississippi River Basin using SWAT within HAWQS. *Science of the Total Environment*, 720, 137562. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137562>
- [10] Zhang, Z., Chen, S., Wan, L., Cao, J., Zhang, Q., & Yang, C. (2021). The effects of landscape pattern evolution on runoff and sediment based on SWAT model. *Environmental Earth Sciences*, 80(2), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09315-6>
- [11] Habibi, A., & Ghodrati, M. (2019). Application of Semi Distributed SWAT Model for Simulation of Runoff in Hableroud Basin. *Journal of Water and Soil Engineering*, 12(43), 40–49
- [12] Salam, M., Alam, F., Hossain, M. N., Saeed, M. A., Khan, T., Zarin, K., Rwan, B., Ullah, W., Khan, W., & Khan, O. (2021). Assessing the drinking water quality of educational institutions at selected locations of district Swat, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 80(322). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09595-6>
- [13] Kazemi Roshkhari, I., Asadi Vaighan, A., & Azari, M. (2024). Impacts of climate change and land use on the discharge of Kashfrod Basin using SWAT model. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(1), 93-109
- [14] Abbaspour, K., et.all. (2022). An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling and Software*, 156, 105497.