



Evaluation of Global and Regional Soil Maps in Flow Forecasting using SWAT Model (Talar Watershed, of Mazandaran Province)

Behrooz Mohseni ^a✉, Mohammad-Javad Mahdavi ^a, Mahdi Ghorbani fard ^a

^a. Department of Engineering and Agricultural Technology, Faculty of Engineering and Technical, Payam-e- Noor University (PNU), Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: mohseni.b2019@pnu.ac.ir

^b. Department of Water Resources Engineering, Faculty Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

SWAT,
Hydrological Response,
Global Soil Map,
Calibration,
Optimization

Article History:

Received:

25 March 2023

Received in revised form:

28 May 2023

Accepted:

30 June 2023

Available online:

4 August 2023

pp. 37-53

ABSTRACT

In most developing countries soil georeferenced data is not yet available. The FAO prepared the global map through the Coordinated Global Soil Database. The aim of this study was to evaluate the required details of the regional map in comparison with the soil global map of Talar watershed using the SWAT model. In this model, climatic data of 2004-2017 were used to simulate runoff. The first two years were used as model warm-up period, 2005-2015 for calibration and 2016-2017 for model validation. Sensitivity and uncertainty analysis, was done in SWAT-CUP software with the help of SUFI-2 algorithm. The evaluation of the model was done using the coefficients of explanation (R^2) and Nash-Sutcliffe (NSE) statistics. The available soil water capacity (SOL_AWC) parameter was determined as a sensitive parameter. Before calibration, 32.7% (global) and 29.3% (regional) precipitation was simulated as daily flow. After recalibration based on the regional soil map (NSE=0.56 and $R^2=0.74$) and global (NSE=0.56 and $R^2=0.64$) and in the verification stage according to the regional soil map (NSE=0.59 and $R^2=0.76$) and global (NSE=0.62) and $R^2=0.75$) was estimated. The results showed the acceptable performance of the model in flow simulation. Sub-basin 9 (deciduous forest) and 14 (summer pasture) had the lowest and highest share in runoff production, respectively. The regional map provided more reliable results. Although the additional information provided by the regional map, while changing the optimized parameters in the model, has no effect on the outflow of the basin, the results indicated that the regional soil map has no significant effect on the flow prediction, and if it is not available, the global soil map information can be used.

Citation: Mohseni, B., Mahdavi, M. J., & Ghorbani fard, M. (2023). Assessing the Evaluation of Global and Regional Soil Maps in Flow Forecasting using SWAT Model (Talar Watershed, of Mazandaran Province). *Geographical planning of space quarterly journal*, 13 (2), 37-53.

<http://doi.org/10.30488/GPS.2023.379075.3608>



© The Author(s)

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Due to the limitation of measurement methods in flood control projects and the need to have a method to generalize existing statistics to basins without statistics or places where measurement is not possible, simulating changes in Future hydrology is one of the main reasons for hydrological simulation. Hydrologists and water resource managers have widely used hydrological models to simulate such changes in the past decades. One of the hydrological models is the Soil and Water Assessment Tools or SWAT model, which was presented in the United States to evaluate the effects of conservation agriculture on hydrological processes and water quality at the watershed scale in 1998. In the SWAT model, the watershed is divided into several sub-basins. Using sub-basins in simulation is beneficial, especially for areas with complex soil characteristics and land use. Then these sub-basins are divided into hydrological response units (HRUs) with the same soil characteristics, land use and management. One important and effective data in this model is soil data and map. Soil data and its related characteristics, including permeability and water retention capacity, determine the amount of runoff production. In most research studies and practical plans, the lack of appropriate soil information prevents researchers and decision-makers from using hydrological models to determine sub-basins sensitive to runoff production. While the existence of soil information (global maps) can make it possible to use hydrological models in basins without measured soil data. This information is such that due to the need for exorbitant cost in stratification and creation of soil profile, usually most areas of the country lack regional soil data, and the need to use the global soil map becomes necessary in such areas. Since this research compares two maps in two different scales for the first time, the main goal of this research is to prepare global and regional soil maps for the Talar watershed of Mazandaran province as one of the most effective SWAT model inputs, the accuracy of this model with two different inputs from soil maps will also be checked in predicting the runoff flow.

Methodology

The first step to implement the SWAT model is to create hydrological response units (HRUs), which form the basis of the work in this study and the Talar watershed as one of the essential sub-basins of the Mazandaran Sea. HRUs are produced by integrating the map of sub-areas created in the study area (through DEM map), soil map, land use and slope. Finally, based on the input maps to the model, 14 sub-basins and 45 hydrological response units (HRUs) were produced in the study area. According to the input data type (minimum and maximum temperature information), the Hargreaves method was used to estimate daily reference evaporation-transpiration when the data of sunshine hours, relative humidity and wind speed were unavailable. In the simulation, the observational data of 2005-2015 were used for calibration and 2016-2017 for model validation. In order to adapt the model to the existing environmental conditions in the region, the first two years of simulation (2004-2005) were considered to warm up the model. After the calibration, the model's accuracy was measured using the obtained parameters and the observed values that were not used in the calibration stage. In case of acceptable simulation, the model will be ready for use. In order to evaluate the efficiency and accuracy of the SWAT model, two coefficients of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE) were used. According to the research based on soil maps, firstly, a global soil map was prepared according to the global raster map, and after analysis in GIS, the soil type of the area was determined and entered into the SWAT database. On the other hand, having the data and soil layers of the region, a regional soil map was prepared, and this map was prepared for entering the SWAT model. After preparing the soil maps (global and regional), the model was implemented twice (the first time by entering the global soil map and the second time by entering the regional soil map). Then, after implementation with two different projects, the outputs of the model were extracted and compared with each other. Finally, to check

the model's accuracy using the above maps' inflow forecasting, it was calibrated and verified through SWAT-CUP.

Results and Discussion

At first, by running the model in two simulation modes (based on the regional and global soil map) in the GIS environment, the Talar watershed was divided into 14 sub-basins and 45 hydrological response units. The results showed that approximately 29.3% of the basin's precipitation and 32.7% of it were lost as base flow or surface flow, respectively, in the global and regional soil maps. Therefore, in these two cases, the simulation resulted in the lowest amount of surface runoff (in the soil map of the region) and the highest amount of evaporation-transpiration (in the global soil map). By analyzing the general sensitivity of the desired parameters, the available soil water capacity parameter (SOL_AWC) was determined as the most sensitive parameter. After the recalibration of the model based on the regional soil map (NSE=0.56 and $R^2=0.74$) and global (NSE=0.56 and $R^2=0.64$) and in the verification stage also according to the regional soil map (NSE=0.59 and $R^2=0.76$) and global (NSE=0.62 and $R^2 = 0.75$) were estimated. Also, the simulated flow (surface and base flow) decreased after recalibrating the model. Evaporation-transpiration and feeding to the deep aquifer increased due to the reduction of capillary rise from the shallow aquifer and the reduction of the minimum amount of water storage required in the aquifer for the base flow event. Despite improving the model's performance in Talar watershed during calibration and validation using the regional soil map, the simulated discharge at the outlet was higher than the observed discharge. So, in the calibration period, compared to the validation period, the model predicted the peak discharge much better. Using the global soil map, the model overestimated the discharge compared to the regional soil map. Therefore, the global soil map showed less accuracy than the regional soil map in the SWAT model, and the results of this research also showed that using soil

information with good resolution can improve flow prediction.

Conclusions

In this study, we used soil information from regional and global soil maps to evaluate the effect of soil data representation and spatial variability. Flow forecasting was done in basin hydrology simulation using the SWAT hydrological model. Before calibrating the model, other water balance components decreased compared to calibrating period except for evapotranspiration. There is no significant difference between the coefficients obtained in the calibration and validation periods of the model. Therefore, the obtained coefficients show the model's efficiency in the direction of runoff simulation in Talar watershed. The results indicate that the use of regional soil information with more spatial details does not significantly affect flow prediction, and global soil information in the form of a global map can be used if this information is unavailable. The additional information provided in the regional soil map, although it can change the optimized parameters in the model, does not affect the watershed discharge. Our simulation results showed the effect of the global soil map used on flow forecasting for Talar watershed, and good resolution soil information (such as regional soil map) can also improve flow forecasting.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



ارزیابی دقت نقشه‌های خاک جهانی و منطقه‌ای در پیش‌بینی جریان با استفاده از مدل SWAT حوزه آبخیز تالار استان مازندران

بهروز محسنی^۱✉، محمدجواد مهدوی^۲، مهدی قربانی فرد^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. Email: mohseni.b2019@pnu.ac.ir
 ۲- گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
 ۳- گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

در اکثر کشورهای در حال توسعه، داده‌های جامع مرجع مکانی دقیق خاک هنوز در دسترس نیست. FAO از طریق پایگاه داده هماهنگ شده جهانی خاک، نقشه جهانی را آماده‌سازی کرد. هدف این مطالعه ارزیابی جزئیات مورد نیاز نقشه منطقه‌ای در مقایسه با نقشه جهانی خاک حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل SWAT بود. در این مدل، داده‌های اقلیمی ۲۰۰۴-۲۰۱۷ برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شد. دو سال اول به‌عنوان دوره گرم کردن مدل، سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۵ جهت واسنجی و ۲۰۱۷-۲۰۱۶ برای صحت‌سنجی مدل بکار گرفته شد. تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در نرم‌افزار SWAT-CUP با کمک الگوریتم SUFI-2 انجام شد. ارزیابی مدل با استفاده از آماره‌های ضرایب تبیین (R^2) و نش-سانکلیف (NSE) انجام شد. پارامتر ظرفیت آب قابل دسترس خاک، پارامتر حساس تعیین شد. بارش (جریان روزمینی) قبل از واسنجی، ۳۲/۷ درصد (جهانی) و ۲۹/۳ درصد (منطقه‌ای) شبیه‌سازی شد. پس از واسنجی بر اساس نقشه خاک منطقه‌ای ($R^2=0.74$ و $NSE=0.56$) و جهانی ($R^2=0.64$ و $NSE=0.59$) و در مرحله صحت‌سنجی نیز به ترتیب منطقه‌ای ($R^2=0.76$ و $NSE=0.62$) و در مرحله صحت‌سنجی نیز به ترتیب منطقه‌ای ($R^2=0.76$ و $NSE=0.59$) و جهانی ($R^2=0.64$ و $NSE=0.62$) برآورد گردید. نتایج بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان بود. زیر حوضه ۹ (جنگل برگ‌ریز) و ۱۴ (چراگاه تابستانه) به ترتیب کمترین و بیشترین سهم را در تولید رواناب داشتند. نقشه منطقه‌ای نتایج مطمئن‌تری ارائه نمود. اگرچه اطلاعات اضافی ارائه‌شده نقشه منطقه‌ای ضمن تغییر پارامترهای بهینه‌شده در مدل، فاقد تأثیر بر جریان خروجی حوضه است، نتایج حاکی از عدم تأثیر قابل توجه نقشه خاک منطقه‌ای، بر پیش‌بینی جریان بود و می‌توان در صورت عدم دسترسی آن، از اطلاعات نقشه خاک جهانی استفاده کرد.

واژگان کلیدی:

SWAT،
پاسخ هیدرولوژیکی،
نقشه خاک جهانی،
واسنجی،
بهینه.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۴/۰۹

تاریخ چاپ:

۱۴۰۲/۰۵/۱۳

صص. ۳۷-۵۳

استناد: محسنی، بهروز؛ مهدوی، محمدجواد و قربانی فرد، مهدی. (۱۴۰۲). شناسای ارزیابی دقت نقشه‌های خاک جهانی و منطقه‌ای در پیش‌بینی جریان با استفاده از مدل SWAT حوزه آبخیز تالار استان مازندران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۳ (۲)، ۵۳-۳۷.

<http://doi.org/10.30488/GPS.2023.379075.3608>



مقدمه

افزایش جمعیت و نیاز به تأمین مواد غذایی از یک سو و عدم توجه به مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز طی سال‌های اخیر از سوی دیگر باعث تغییرات شدید در سطح حوزه‌های آبخیز و به تبع آن وقوع سیلاب خطرناک شده است (Lal et al., 2005: 137-142). از آنجایی که در اغلب حوزه‌های آبخیز کشور، وقوع سیل و خسارت‌های ناشی از آن روند افزایشی دارد، تعیین مناطق مولد رواناب و اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر پروژه‌های کنترل سیل و مدیریت جامع آبریزها ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین درک و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به رواناب و رسوب در پهنه‌های طبیعی، به واسطه محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط سخت فیزیکی حاکم بر حوزه‌های آبخیز و نیز نوسانات غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی، از قبیل خشک‌سالی در درازمدت همیشه میسر نیست (مرادی و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۳). از طرفی به دلیل محدود بودن روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی و نیاز به داشتن روشی برای تعمیم آمار موجود به حوضه‌های بدون آمار یا مکان‌هایی که اندازه‌گیری در آن‌ها امکان‌پذیر نیست، شبیه‌سازی تغییرات هیدرولوژیکی آینده از دلایل اصلی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی است (رضائی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۳۰). برای شبیه‌سازی این‌گونه تغییرات در دهه‌های گذشته، مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور وسیعی از سوی هیدرولوژیست‌ها و مدیران منابع آب به‌منزله ابزاری برای آنالیز سیستم‌های مدیریت حوزه‌های آبخیز بکار برده شده است. یکی از مدل‌های هیدرولوژیک، ابزار ارزیابی آب‌و‌خاک (SWAT) است. این مدل با داشتن مبنای فیزیکی و مدل‌سازی مکانی تغییرات شرایط هیدرولوژیکی، خاک و پوشش گیاهی، برآورد درستی از وضعیت مکانی رواناب حوضه فراهم می‌کند و با اتصال به نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، داده‌های جمع‌آوری‌شده را به‌طور صحیح به مکان مناسب در حوزه آبخیز اختصاص می‌دهد (فرخ‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۲؛ Arnold et al, 2012: 1493). بنابراین، توانایی شناسایی و اولویت‌بندی رواناب را در سرمنشأ آن به‌صورت متمرکز دارند. در سال‌های اخیر این مدل به دلیل ویژگی‌های فوق در مقایسه با بسیاری دیگر از مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بهتری را در برآورد رواناب ارائه داده است. یکی از داده‌های مهم و اثربخش در این مدل داده و نقشه خاک است. داده خاک و ویژگی‌های مرتبط با آن از جمله نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب، تعیین‌کننده میزان تولید رواناب می‌باشد (کاویان و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۹). ارزیابی تأثیر کیفیت و دقت مکانی داده‌های خاک، روی کیفیت و دقت رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج مختلفی نیز حاصل شده است. در این راستا، اثربخشی پیش‌بینی مدل به نوع و کیفیت داده‌های ورودی خاک بستگی دارد و داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر در مقایسه داده‌های با قدرت تفکیک مکانی پایین‌تر نتایج بهتری را ارائه می‌دهد (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۳۰).

آدم و همکاران (Adem et al, 2020) به ارزیابی انواع بانک اطلاعاتی خاک برای پیش‌بینی جریان در بالادست رودخانه نیل آبی پرداختند. آن‌ها خروجی‌های مدل SWAT را با استفاده از داده‌های خاک FAO، سرویس اطلاعات خاک آفریقا (AfSIS) و شرکت طراحی و نظارت آمه‌ارا (ADSWE) مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی قبل از کالیبراسیون مدل برای هر سه نوع داده خاک که به‌عنوان ورودی استفاده شدند ضعیف بود. پس از کالیبراسیون مدل نسبت به قبل از کالیبراسیون، ضریب نش - ساتکلیف به حدود ۶۸/۰ بهبود یافت. پیش‌بینی‌ها از نظر آماری برای سه پایگاه داده خاک که استفاده از نقشه جهانی خاک فائو را برای پیش‌بینی دبی جریان حوضه در مناطق فاقد داده توجیه می‌کنند، مشابه بود.

اورک و همکاران (Oruç et al., 2022)، به ارزیابی اثرات کیفیت داده‌های خاک بر عملکرد پیش‌بینی رواناب مدل SWAT در حوضه آبریز ساز-کایرووا ترکیه پرداختند. در تحقیق آن‌ها نمونه‌های خاک از ۲۹ مکان جمع‌آوری شد. سپس ۷ مورد از ۱۳ پارامتر خاک موردنیاز توسط مدل SWAT از طریق مطالعات میدانی و آزمایشگاهی برای ایجاد یک پایگاه داده خاک مشخص (SSM¹) تولید شد. دو حالت شبیه‌سازی با استفاده از پایگاه داده خاک SSM و سازمان خواربار و کشاورزی (FAO)، قبل و بعد از کالیبراسیون ساخته شد. آن‌ها دریافتند که SSM برای دقت مدل در حوضه‌های کوچک که پوشش طبیعی خاک به دلیل فعالیت‌های غیرطبیعی کاهش یافته است، ضروری است. خسروی و همکاران (۱۴۰۱) بررسی کارایی مدل SWAT به تحلیل مکانی رواناب در حوزه آبخیز دامغان رود که فاقد داده‌های محلی خاک بود پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب با داده جهانی خاک قابل قبول بوده است. همچنین نتایج کلی تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل SWAT در تحلیل مکانی رواناب حوزه آبخیز به دلیل تقسیم‌بندی حوضه به واحدهای همگن، امکان شناسایی مناطق بحرانی تولید رواناب را دارد. رضازاده و همکاران (۱۳۹۷) به شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر- تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب از طریق مدل SWAT پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از نقشه جهانی خاک فائو به عنوان ورودی نقشه خاک استفاده کردند. در این پژوهش، شبیه‌سازی رواناب، تبخیر- تعرق واقعی و بار رسوب حوضه سلطانی بافت با به‌کارگیری دو سناریوی مدیریتی برای کاهش رسوب با استفاده از مدل SWAT برای دوره آماری ۳۳ ساله از ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۱ انجام گرفت.

در بیشتر مطالعات پژوهشی و طرح‌های کاربردی، نبود اطلاعات مناسب خاک مانع استفاده محققین و تصمیم‌گیران از مدل‌های هیدرولوژیکی در تعیین زیر حوضه‌های حساس به تولید رواناب می‌شود. درحالی‌که وجود اطلاعات و نقشه‌های جهانی خاک می‌تواند امکان استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی را در حوضه‌های فاقد داده اندازه‌گیری شده خاک ممکن سازد. این اطلاعات به‌گونه‌ای است که به دلیل نیاز به هزینه گزاف در لایه‌برداری و ایجاد پروفیل خاک معمولاً اغلب حوزه‌های کشور فاقد داده‌های خاک منطقه‌ای هستند و لزوم کاربرد نقشه خاک جهانی در چنین مناطقی ضرورت می‌یابد. حوزه آبخیز تالار از جمله این حوضه‌هاست. رودخانه تالار در منطقه شمال رشته‌کوه‌های البرز و در جنوب دریای مازندران، در محدوده جغرافیایی استان مازندران و شهرستان‌های سوادکوه، قائم‌شهر و جویبار جریان دارد. این رودخانه، در دره نسبتاً باریکی تا محل شهر شیرگاه (سوادکوه شمالی) جریان یافته و رودخانه کسلیان در این محل از سمت راست به آن وصل می‌شود. سپس شاخه‌های فرعی توجی و تجون به آن می‌ریزند و پس از گذشتن از زیر پل ملک کلا وارد جلگه شده و در پایین‌دست محله عرب‌خیل به دریای مازندران می‌ریزد (سهرابی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷: ۴). بنابراین حوزه آبخیز تالار به‌عنوان یکی از رودخانه‌های مهم در تأمین آب کشاورزی، پرورش ماهی و تخلیه آلاینده‌های متعدد به آن و در نتیجه آلودگی بیش‌ازحد، دارای نقش حیاتی از لحاظ منابع آب‌و خاک است. از طرف دیگر نقش این منابع در سیل‌خیزی و جریانات سیلابی حوضه نیز بر اهمیت تحقیق می‌افزاید. از آنجایی‌که نخستین بار به مقایسه دو نقشه در دو مقیاس متفاوت پرداخته‌ایم، لذا این تحقیق سعی دارد مقادیر جریان رواناب را به‌عنوان یکی از منابع آلاینده آب‌و خاک در حوضه موردنظر از طریق مبنا قرار دادن نقشه‌های خاک، مطالعه و دقت آن‌ها را بررسی نماید. این کار با استفاده از مدل SWAT از طریق مؤثرترین ورودی‌های مدل یعنی نقشه‌های خاک (نقشه‌های خاک جهانی و منطقه‌ای) برای حوزه آبخیز تالار استان مازندران انجام خواهد شد. درنهایت پاسخگویی به سؤالاتی همچون؛ دقت و کارایی لازم مدل SWAT در حوزه آبخیز تالار؟ عامل مؤثر محسوب شدن نقشه خاک در ارزیابی نهایی مدل؟ و تفاوت در مقدار جریانات

خروجی حوضه با کاربرد نقشه‌های خاک در دو مقیاس مختلف؟ از اهداف اصلی این تحقیق به شمار می‌آید.

مبانی نظری

در مدل‌های هیدرولوژیکی، پارامترهای فیزیکی زیادی در حال اندرکنش هستند و اندازه‌گیری دقیق آن‌ها در آبخیزهای بزرگ امکان‌پذیر نیست یا نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد است. جهت نیل به این هدف، بررسی کارایی مدل پیش از استفاده آن از طریق واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت ضروری است. گام اول در بررسی کارایی مدل، انجام تحلیل حساسیت برای تعیین پارامترهای حساس در اجرای مدل به منظور واسنجی است. هدف از تحلیل حساسیت، تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد. روش‌های مورد استفاده برای انجام تحلیل حساسیت در حالت کلی به دو گروه "تحلیل‌های سراسری و موضعی" طبقه‌بندی می‌شوند. روش تحلیل سراسری قادر بوده تا تحلیل حساسیت را برای کل دامنه پارامترهای مدل اجرا کرده و در این روش تمام پارامترهای تحت بررسی که به طور هم‌زمان تغییر داده می‌شوند، واکنش‌ها و اثرات آن‌ها روی خروجی مدل ارزیابی می‌گردد. در مقابل، تحلیل موضعی که به روش "یک (فاکتور) در یک‌زمان (OAT)" نیز شناخته می‌شود در حقیقت واکنش شبیه‌سازی مدل را به تغییرات پیوسته هر پارامتر در شرایط ثابت بودن سایر پارامترها مورد بررسی قرار می‌دهد.

از جمله این مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل SWAT (ابزار ارزیابی آب‌و خاک) است که در ایالات متحده برای ارزیابی اثرات کشاورزی حفاظتی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب در مقیاس حوضه آبریز در سال ۱۹۹۸ ارائه شد. این مدل، یک مدل فیزیک-پایه و جامع نیمه توزیعی است که به طور گسترده برای پیش‌بینی تأثیر مدیریت اراضی روی آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Arnold et al, 1998: 76). در مدل SWAT، حوضه آبریز به چندین زیر حوضه تقسیم می‌گردد. استفاده از زیر حوضه‌ها در شبیه‌سازی، بخصوص برای مناطقی با خصوصیات خاک و کاربری اراضی پیچیده که می‌تواند منجر به ناهمگنی در خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه گردد، بسیار مفید است. سپس این زیر حوضه‌ها به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌گردند که این واحدها دارای خصوصیات خاک، کاربری اراضی و مدیریت یکسان هستند (محسنی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۱۳).

محاسبات مربوط به شبیه‌سازی در این واحدها انجام می‌شود و سپس به کل حوضه تعمیم می‌یابد. در مدل SWAT، رواناب سطحی با استفاده از روش‌های شماره منحنی (CN) اصلاح‌شده سازمان حفاظت خاک آمریکا و نفوذ گرین-آمپت و روندیابی جریان با استفاده از دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگ‌ها قابل محاسبه می‌باشد. فرآیندهای هیدرولوژیکی که در این مدل می‌توانند شبیه‌سازی شوند شامل؛ تبخیر-تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی هستند. این مدل به منظور شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی از معادله بیلان آب (رابطه ۱) به شرح ذیل استفاده می‌کند:

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

که در آن؛ SW_t محتوای نهایی آب خاک (میلی‌متر)، SW_0 محتوای اولیه آب (میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارش در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر-تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدار آب ورودی به پروفیل خاک (منطقه غیراشباع) در روز i ام (میلی‌متر) و Q_{gw} مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر)

می‌باشد.

روش پژوهش

در این تحقیق که از نسخه ۲۰۱۲ مدل SWAT استفاده شد، اطلاعات موردنیاز شامل داده‌های هواشناسی (بارندگی روزانه، حداقل و حداکثر دمای روزانه، تابش خورشیدی روزانه، سرعت باد و رطوبت نسبی) می‌باشند. این داده‌ها از یک ایستگاه سینوپتیک، ۴ ایستگاه باران‌سنجی و ۳ ایستگاه تخیرسنجی برای یک دوره ۱۴ ساله (۲۰۰۴-۲۰۱۷) تهیه شد. برای تولید و تکمیل داده‌های هواشناسی از weather generator استفاده شد. داده‌های دبی منطقه مورد مطالعه، از شرکت آب منطقه‌ای مازندران برای ۳ ایستگاه هیدرومتری شیرگاه، خطیر کوه_دوآب و پالندردبار برای دوره مشترک آماری (۲۰۱۷-۲۰۰۴) آماده‌سازی شد. نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، با تفکیک مکانی ۳۰ متر از نقشه توپوگرافی منطقه استخراج شد. لایه شیب بر اساس توپوگرافی و خصوصیات فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه و بر اساس روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) در ۵ کلاس (۰-۵ درصد، ۵-۱۰ درصد، ۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-۴۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد) تولید شد. در نهایت نقشه کاربری اراضی، با توجه به گزارش تلفیق شرکت آب منطقه‌ای مازندران، تصاویر ماهواره‌ای لندست (۲۰۱۷) و تطبیق آن با عملیات صحرایی، آماده‌سازی شد.

پس از آماده‌سازی اطلاعات ورودی، گام اول برای اجرای مدل SWAT، ایجاد واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی یعنی HRUs است که اساس محاسبه را در این مطالعه تشکیل می‌دهد. به واسطه ادغام نقشه زیر حوضه‌های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه (از طریق ترسیم مرز آبخیز با کمک نقشه DEM و سیستم شبکه جریان)، نقشه خاک، کاربری اراضی و شیب، HRU ها تولید می‌شوند. یک مدل با استفاده از HRU های غالب (انواع غالب خاک و کاربری اراضی) ساخته می‌شود. در گام دوم با تعریف حد آستانه ۲۰-۱۰-۲۰٪ (کاربری اراضی، خاک و شیب)، HRU های مختلف ساخته شد (محسنی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۱۵). در نهایت بر اساس نقشه‌های ورودی به مدل، تعداد ۱۴ زیر حوزه و ۴۵ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) در منطقه مورد مطالعه تولید شدند. با توجه به نوع داده ورودی موجود (اطلاعات حداقل و حداکثر دما)، برای برآورد تخییر- تعرق مرجع روزانه که داده‌های ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در دسترس نبود از روش هارگریوز استفاده شد (Hargreaves & Samani, 1985: 96-99). برای روندیابی آب از طریق شبکه کانال نیز از روش ذخیره متغیر استفاده شد. روند بارندگی روزانه/شماره منحنی (CN)، روش به کار گرفته شده برای بارش- رواناب در این مدل می‌باشد.

در این تحقیق، با توجه به تعدد پارامترهای مدل، جهت انجام موفق و سریع‌تر مرحله واسنجی، از تحلیل حساسیت موضعی برای شناسایی پارامترهای حساس و مهم‌تر در مدل استفاده شد و نتایج حاصل با استفاده از آزمون t-test مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی به دامنه پارامترها وابسته است. رتبه حساسیت که برای هر پارامتر بر اساس p-value و t-stat اختصاص داده می‌شود (t-stat اندازه‌گیری حساسیت را ارائه می‌دهد و در مقادیر مطلق بزرگ‌تر حساس‌تر هستند، اما p-value اهمیت حساسیت را نشان می‌دهد و مقادیر نزدیک به صفر از اهمیت بیشتری برخوردار هستند) بنابراین، رتبه‌بندی در هر دو حالت (t-stat یا p-value) نتیجه یکسانی را می‌دهد، یعنی یک پارامتر چه بر اساس t-stat یا p-value رتبه‌بندی شود، دارای رتبه یکسانی خواهند بود (Mohseni et al, 2022: 4).

در ادامه برای واسنجی دقیق، تحلیل عدم قطعیت و صحت‌سنجی مدل SWAT در حوزه آبخیز تالار، از نرم‌افزار SWAT-CUP 2019 و الگوریتم SUFI-2 استفاده شد. SUFI-2 یک الگوریتم نیمه‌خودکار مدل‌سازی معکوس است.

این الگوریتم برای ارزیابی عدم قطعیت، دو معیار P-factor و R-factor را محاسبه می‌کند (Abbaspour et al, 2015: 738-740). در این تحقیق، واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT به ترتیب برای سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۵ و ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و بر اساس داده‌های مشاهده‌ای دبی ماهانه در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب اقدام شد (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب در منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	کد ایستگاه	مختصات جغرافیایی (utm)		ارتفاع ایستگاه (متر)
		طول	عرض	
شیرگاه	۳۱	۶۶۹۳۶۵	۴۰۱۸۷۸۵	۲۱۸
خطیر کوه-دوآب	۷۱	۶۸۵۱۷۱/۳	۳۹۸۶۰۵۴/۴	۸۷۶
پالندردبار	۷۴	۶۷۱۴۰۹	۳۹۸۷۸۶۵	۱۲۱۸

در شبیه‌سازی، از داده‌های مشاهده‌ای سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۵ جهت واسنجی و ۲۰۱۶-۲۰۱۷ نیز جهت صحت‌سنجی مدل استفاده شد. به منظور تطابق و سازش مدل با شرایط محیطی موجود در منطقه، دو سال اول شبیه‌سازی (۲۰۰۴-۲۰۰۵) برای گرم کردن^۱ مدل لحاظ گردید. پس از واسنجی، صحت مدل با استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده و مقادیر مشاهده‌ای که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفت، سنجیده شد. در صورت شبیه‌سازی قابل قبول، مدل برای کاربرد آماده خواهد بود. جهت ارزیابی کارایی و دقت مدل SWAT، از دو آماره ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NS)، استفاده شد (Oeurng et al, 2011: 148).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)(S_i - \bar{S})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2)^{0.5}} \right]^2 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

که در آن‌ها؛ O_i مقدار مشاهده‌ای، S_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، \bar{O} میانگین مقدار مشاهده‌ای، \bar{S} میانگین مقدار شبیه‌سازی‌شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقادیر عددی ضریب NSE از منفی بی‌نهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر آن است که مدل SWAT در منطقه مورد مطالعه برآورد بهتری داشته و کارایی لازم را داراست. عموماً اگر شاخص نش - ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد؛ کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۳۶ - ۰/۷۵ باشد رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد کارایی مدل غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash & Sutcliffe, 1970: 282-290). ضریب رگرسیون (R^2) نیز که از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، شاخص قدرتمندی برای بیان رابطه مناسب بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است. این شاخص به‌تنهایی نمی‌تواند تطابق داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را نشان دهد. اگر همراه با R^2 ، معادله خط رگرسیون ($y=bx+a$) بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای نیز مدنظر قرار گیرد، تطابق این مقادیر بهتر نشان داده خواهد شد. مقادیر پیشنهادی NSE در مطالعات هیدرولوژیک و فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه، باید از ۰/۵ بزرگ‌تر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول فرض کرد که همین معیار نیز معمولاً برای ضریب همبستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (890 Moriasi et al, 2007).

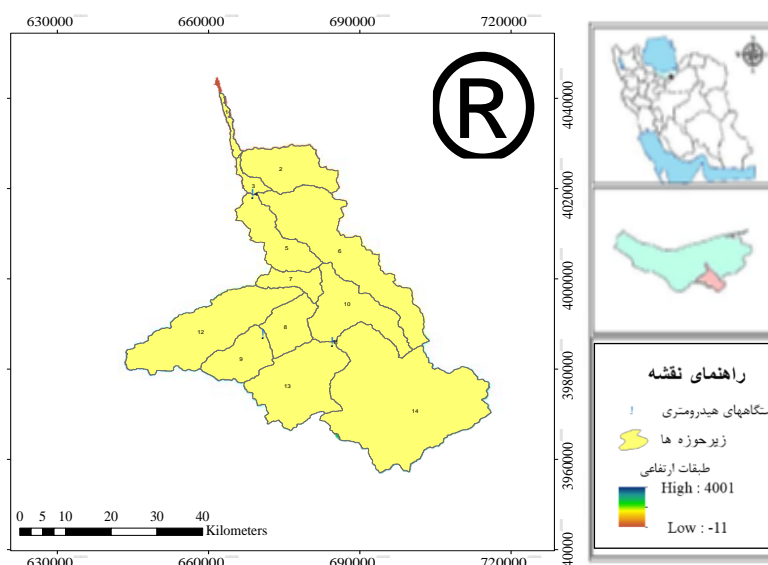
با توجه به اساس این تحقیق بر مبنای نقشه‌های خاک، ابتدا طبق نقشه رستری جهانی، نقشه جهانی خاک آماده‌سازی شد و پس از تحلیل در GIS، نوع خاک منطقه مشخص و در دیتابیس SWAT وارد شد. از طرف دیگر با در اختیار داشتن داده‌ها و لایه‌های خاک منطقه نیز نقشه خاک به‌صورت منطقه‌ای تهیه و این نقشه برای ورود به مدل SWAT

1. warm-up

آماده‌سازی شد. پس از آماده‌سازی نقشه‌های خاک (جهانی و منطقه‌ای)، مدل دو مرتبه (مرتبه اول از طریق ورود نقشه خاک جهانی و بار دیگر با ورود نقشه خاک منطقه) اجرا شد. پس از اجرا با دو پروژه متفاوت، خروجی‌های مدل استخراج شده و با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت برای بررسی دقت مدل با استفاده از نقشه‌های فوق در پیش‌بینی جریان، از طریق SWAT-CUP اقدام به واسنجی و صحت‌سنجی شد.

محدوده مورد مطالعه

رودخانه تالار به‌عنوان یکی از زیر حوضه‌های مهم دریای مازندران بوده که زهکشی آب‌های تولیدی بخشی از دامنه‌های شمالی البرز مرکزی را عهده‌دار است. آبخیز تالار یکی از آبخیزهای کوهستانی شمال کشور با مساحت ۲۲۷۳۴۶/۶۵ هکتار می‌باشد که در مسیر اصلی جاده تهران- قائم‌شهر واقع شده است (شکل ۱). حوضه مورد مطالعه در طول‌های شرقی (۳۵° ۴۴' تا ۳۶° ۱۹') و عرض‌های شمالی (۵۲° ۳۳' تا ۵۲° ۳۵') واقع شده است که به‌وسیله یک رود اصلی به نام تالار در امتداد جنوب به شمال زهکشی می‌شود. از سرشاخه‌های مهم آن می‌توان به رودخانه‌های سرخ‌آباد، شورآب، کبیر، بزلا، چرات و شش‌رودبار اشاره کرد. حوضه تالار از غرب به آبخیز تالار، از شرق به سیاهرود، از جنوب به آبخیز تجن و از شمال به دشت قائم‌شهر محدود می‌شود. بلندترین ارتفاع در دورترین نقطه شمال غرب حوضه، با ارتفاع ۳۹۱۰ و کمترین ارتفاع در خروجی حوضه با ارتفاع ۲۱۵ متر از سطح دریای آزاد قرار گرفته است. شکل عمومی حوضه، پهن و دارای امتداد شمالی- جنوبی است. میانگین و حداکثر ارتفاع آن به ترتیب ۲۰۰۱ و ۴۰۰۱ متر است. میانگین بارندگی درازمدت این حوضه، ۷۲۹ میلی‌متر در سال و میانگین دبی درازمدت آن نیز ۱۴/۳ مترمکعب بر ثانیه است (گلشن و همکاران، ۱۳۹۷: ۴). ضریب برف‌گیری سالانه محدودۀ مطالعاتی حوضه ۲۲ درصد برآورد شده است. متوسط درجه حرارت در شبکه ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰۲). بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه، وضعیت اقلیمی این منطقه به ۵ ناحیه اقلیمی از ناحیه خشک سرد تا مرطوب معتدل تقسیم‌بندی شده است (غلامی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۶۶).

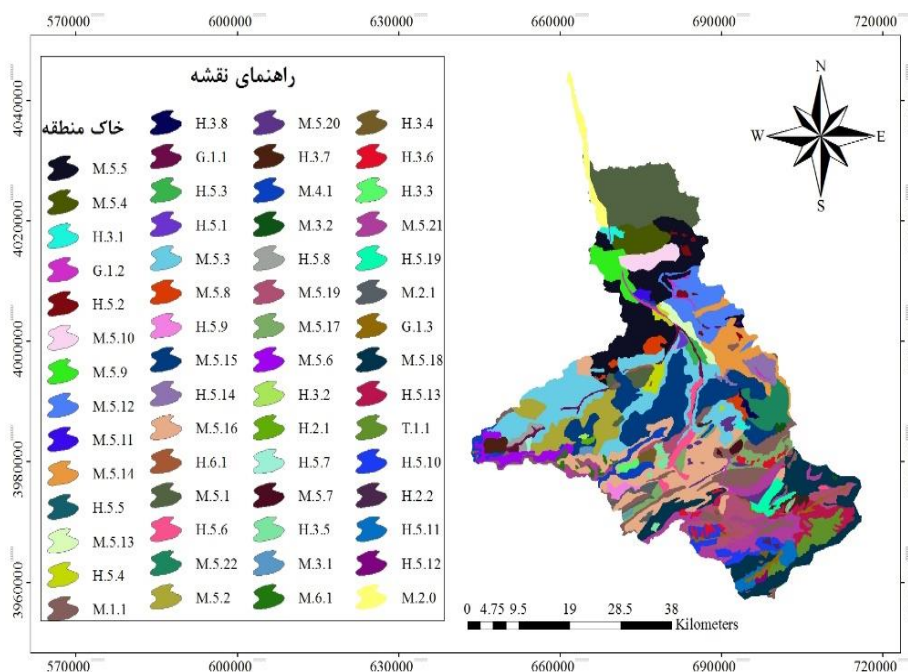


شکل ۱. زیر حوضه‌ها و موقعیت حوزه آبخیز تالار در کشور و استان مازندران

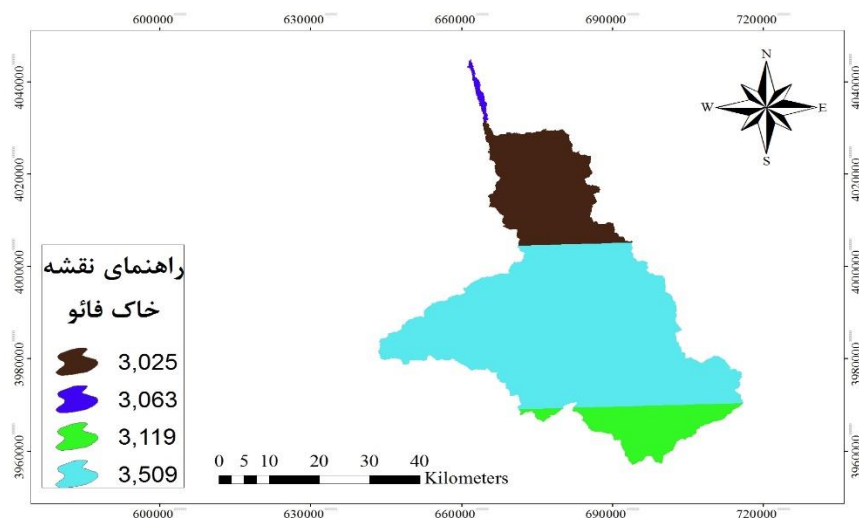
یافته‌ها

زیر حوضه‌ها، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs)، نقشه کاربری و نقشه‌های خاک

در ابتدای کار، بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل در محیط GIS، حوزه آبخیز تالار به ۱۴ زیر حوضه و ۴۵ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم‌بندی شد. با توجه به اساس کار این مطالعه مبتنی بر نقشه‌های خاک، نتایج حاصل از نقشه‌های خاک منطقه‌ای همراه با تعداد زیر حوضه‌ها در شکل ۲ ارائه شد. کمترین بافت خاک به بافت‌های H.3.2 و (۱۹٪ رس، ۵۴٪ سیلت و ۲۷٪ شن) و H.5.5 (۷٪ رس، ۸۰٪ سیلت و ۱۳٪ شن) هر یک با مساحت ۱۱۷/۰۸ و ۱۲۹/۹۲ هکتار و بیشترین بافت خاک نیز مربوط به M.5.3 (۷٪ رس، ۷۰٪ سیلت و ۲۳٪ شن) با مساحت ۲۱۰۰۳/۵۴ هکتار مربوط بود. همچنین نتایج حاصل از نقشه خاک جهانی در شکل ۳ ارائه شد. در این نقشه کمترین بافت خاک به بافت ۳۰۶۳ (۳۷٪ رس، ۳۰٪ سیلت و ۳۳٪ شن) با مساحت ۷۶۱/۲۰ هکتار و بیشترین آن مربوط به بافت ۳۵۰۹ (۲۶٪ رس، ۳۹٪ سیلت و ۳۵٪ شن) با مساحت ۱۵۶۸۸۱/۳۰ هکتار مربوط بود. دامنه تغییرات شیب منطقه در پنج کلاس شیب ۰-۵ درصد، ۵-۱۰ درصد، ۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-۴۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد تقسیم‌بندی شد. بر اساس نقشه خاک دو حوضه، تفاوت‌های مکانی زیادی را در دو حالت نقشه‌های خاک نشان داد (اشکال ۲ و ۳). به‌عنوان مثال، مقدار سیلت از ۷۰٪ در نقشه خاک منطقه تا ۳۹٪ در نقشه خاک جهانی با دارا بودن بیشترین مساحت در حوزه آبخیز تالار متغیر بود. بر این اساس، بخش اعظم و قابل توجهی از بافت خاک منطقه شامل سیلت بود.

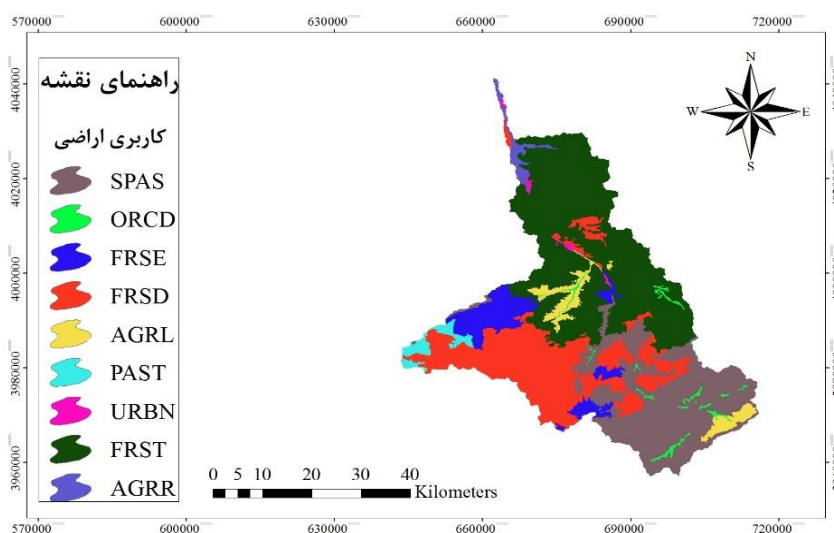


شکل ۲. نقشه خاک منطقه‌ای حوزه آبخیز تالار حاصل از مدل SWAT



شکل ۳. نقشه خاک جهانی حوزه آبخیز تالار حاصل از مدل SWAT

نقشه کاربری اراضی نیز به‌عنوان یکی از لایه‌های مهم اطلاعاتی تهیه و وارد مدل شد. بر اساس شکل ۴، ملاحظه می‌شود غالب کاربری در منطقه را جنگل مخلوط (FRST) با حدود ۳۸/۲۸ درصد مساحت به خود اختصاص داد. بقیه کاربری‌ها به ترتیب به چراگاه تابستانه (SPAS) با ۲۳/۷۷ درصد، جنگل برگ‌ریز (FRSD) با ۲۳/۲۲ درصد، جنگل همیشه‌سبز (FRSE) با ۶/۶۸ درصد، زمین‌های کشاورزی گرامینه (AGRL) با ۳/۴۱ درصد، چراگاه (PAST) با ۱/۷۳ درصد، کشت محصولات ردیفی (AGRR) با ۱/۳۷ درصد، باغات (ORCD) با ۱/۱۲ درصد و مناطق مسکونی (URBN) با ۰/۴ درصد اختصاص یافت (شکل ۳).



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تالار حاصل از مدل SWAT

مؤلفه‌های بیلان آب قبل از واسنجی

مؤلفه‌های مدل تحت دو نقشه جهانی و منطقه‌ای خاک برای حوزه آبخیز تالار در جدول ۲ ارائه شد. بین اجزای بیلان آب برای هر دو حالت نقشه‌های مورد استفاده تفاوت مشخصی وجود داشت. به‌طوری‌که طبق جدول مثلاً مقدار رواناب سطحی حاصل از نقشه خاک جهانی در حوزه آبخیز تالار در مقایسه با رواناب سطحی پیش‌بینی شده با نقشه خاک منطقه

مورد مطالعه بیشتر بود. این دو حالت شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تقریباً ۲۹/۳ درصد بارش حوضه و ۳۲/۷ درصد آن به ترتیب بر اساس نقشه خاک جهانی و منطقه‌ای به‌عنوان جریان پایه یا جریان روزمینی از بین رفت. در این دو حالت، شبیه‌سازی منجر به کمترین میزان رواناب سطحی (در نقشه خاک منطقه) و بیشترین مقدار تبخیر- تعرق (در نقشه خاک جهانی) شد (جدول ۲).

جدول ۲. اجزای بیلان آب سالانه شبیه‌سازی شده با مدل SWAT تحت دو نقشه جهانی و منطقه‌ای

مؤلفه‌ها						
حوزه آبخیز	نقشه خاک	بارش	تبخیر- تعرق	رواناب جریان		تبخیر آبخوان کم عمق
				جریان جانبی	رواناب سطحی	
				جریان پایه		
تالار	منطقه‌ای	۶۹۷	۲۳۳/۹	۱۶/۱۷	۱۶۵/۰۹	۱۲/۷۵
	جهانی	۶۹۷	۲۶۱/۱	۷۰/۵۷	۶۲/۷۷	۱۷/۴۴

مدل SWAT بر اساس هر دو نقشه خاک، دبی شبیه‌سازی شده (هم رواناب سطحی و هم جریان پایه) را در مقایسه با دبی مشاهده‌ای (۱۴/۳) بیش‌ازحد برآورد کرد. مستقل از نوع نقشه‌های رقومی خاک مورد استفاده، مدل دبی را در حوزه آبخیز تالار قبل از واسنجی، بیش‌ازحد پیش‌بینی نمود (جدول ۲، اشکال ۵ و ۶).

تحلیل حساسیت

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت کلی پارامترهای مورد نظر در جدول شماره ۳ ارائه شد. در تجزیه و تحلیل حساسیت، ۱۵ پارامتر ورودی از ۲۲ مورد انتخاب شد. بر اساس این نتایج، پارامتر ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL_AWC) حساس‌ترین پارامتر بود. زمان تأخیر آب زیرزمینی (DELAY_GW) نیز در ردیف دوم حساسیت قرار گرفت. ضریب تعیین نفوذ به آبخوان عمیق یا صعود موئینگی از آبخوان کم عمق (ضریب تبخیر آب زیرزمینی) (GW_REVAP)، چگالی خاک در حالت مرطوب (SOL_BD)، هدایت هیدرولیکی خاک (SOL_K) به ترتیب در رتبه‌های سوم تا پنجم حساسیت قرار گرفتند. شش مورد از حساس‌ترین پارامتر ورودی که بیشترین تغییر را در دبی برای تغییر نسبی یکسان در مقدار ورودی حوزه آبخیز تالار ایجاد کردند عبارت بودند از: زمان تأخیر آب زیرزمینی (DELAY_GW)، صعود موئینگی از سفره کم عمق (GW_REVAP)، شماره منحنی رواناب SCS (CN2)، عمق اولیه آب در آبخوان عمیق (v_DEEPST)، عمق اولیه آب زیرزمینی (V_GWHT) و حداقل مقدار ذخیره آب لازم در سفره برای رویداد جریان پایه (GWQMN) (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها

نام پارامتر	تشریح پارامتر	مقدار بهینه پارامتر	t-stat	p-value
r_SOL_AWC.sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰/۰۰۷۴	۱/۵۳	۰/۱۴
v_GW_DELAY.gw	زمان تأخیر آب زیرزمینی	۵۹۷/۸۷	-۱/۱۷	۰/۲۵
v_GW_REVAP.gw	صعود موئینگی از سفره کم عمق	۰/۰۷۶	۱/۱۷	۰/۲۶
r_SOL_BD.sol	چگالی خاک در حالت مرطوب	-۰/۰۷۸	۱/۰۳	۰/۳۱
r_SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی خاک	-۰/۸۴	۰/۹	۰/۳۸

۰/۴	۰/۸۵	۰/۹۵	ضریب تبخیر خاک	v_ESCO.Hru
۰/۴۲	-۰/۸۲	۰/۱۳	فاکتور جبران نگهداشت گیاهی	v_EPCO.hru
۰/۴۳	-۰/۸	۰/۶۲	عمق اولیه آب در آبخوان عمیق	v_DEEPST.gw
۰/۴۸	-۰/۷۲	۳۲/۲۰	هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی	v_CH_K2.rte
۰/۷۱	-۰/۳۷	۳/۰۸	حداکثر میزان ذوب برف در سال	v_SMFMX.bsn
۰/۷۳	-۰/۳۳	۰/۸۸	عمق اولیه آب زیرزمینی	V_GWHT.gw
۰/۷۵	۰/۳۲	۱/۰۹	حداقل مقدار ذخیره آب لازم در سفره برای رویداد جریان پایه	v_GWQMN.gw
۰/۸۳	۰/۲	-۰/۵۷	شماره منحنی روش SCS	r_CN2.mgt
۰/۸۷	-۰/۱۶	۱/۰۷	ضریب تأخیر رواناب (روز)	v_SURLAG.bsn
۰/۸۹	۰/۱۳	-۰/۰۹	شیب متوسط رودخانه اصلی	V_CH_S2.rte

مؤلفه‌های بیلان آب در دوره واسنجی

بر اساس جدول ۴ و ۵، اجزای بیلان آب سالانه شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی با مدل SWAT تحت دو نقشه جهانی و منطقه‌ای و همچنین سهم تولید رواناب هر یک از زیر حوضه‌ها ارائه شد. به‌طور قابل توجهی پس از واسنجی مدل در هر دو حالت نقشه‌های خاک تغییر کرد. پس از واسنجی مدل، جریان شبیه‌سازی شده (جریان سطحی و جریان پایه) کاهش یافت و تبخیر-تعرق و تغذیه به آبخوان عمیق به دلیل کاهش صعود موئینگی از سفره کم‌عمق و کاهش حداقل مقدار ذخیره آب لازم در سفره برای رویداد جریان پایه، افزایش یافت (جدول ۲ در مقایسه با جدول ۴).

جدول ۴. اجزای بیلان آب سالانه شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی با مدل SWAT تحت دو نقشه جهانی و منطقه‌ای

حوزه آبخیز	نقشه خاک	بارش	تبخیر- تعرق	رواناب جریان		تغذیه به آبخوان عمیق	تبخیر آبخوان کم‌عمق
				جریان سطحی	جریان جانبی		
تالار	منطقه‌ای	۶۹۷	۳۲۵/۱۰	۱/۴۸	۱۱۴/۹۳	۱۵/۱۳	۰/۰۴
جهانی	جهانی	۶۹۷	۲۸۵/۴	۵/۵	۱۳۴/۲	۲۰/۱	۰/۰۴

جدول ۵. درصد مشارکت هریک از زیر حوضه‌ها در رواناب خروجی حوزه آبخیز تالار حاصل از مدل SWAT

شماره زیر حوضه	درصد مشارکت در سال‌های شبیه‌سازی											
	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷
۱	۱۰/۸۱	۱۰/۹۲	۱۱/۰۹	۱۰/۸۱	۱۰/۵۲	۱۰/۷۶	۱۰/۹۱	۱۱/۰۱	۱۰/۹۱	۱۱/۱۸	۱۱/۰۴	۱۰/۹۴
۲	۱/۱۷	۱/۲۰	۱/۳۱	۱/۱۶	۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۲۵	۱/۱۳	۱/۱۷	۱/۳۴	۱/۲۳	۱/۳۱
۳	۱۰/۰۹	۱۰/۱۶	۱۰/۳۱	۱۰/۱۲	۹/۹۲	۱۰/۰۷	۱۰/۱۷	۱۰/۲۶	۱۰/۱۷	۱۰/۳۸	۱۰/۳۰	۱۰/۱۹
۴	۸/۵۳	۸/۵۶	۸/۶۱	۸/۶۱	۸/۵۷	۸/۵۷	۸/۵۷	۸/۶۸	۸/۵۷	۸/۶۳	۸/۶۷	۸/۵۵
۵	۸/۵۴	۸/۵۶	۸/۶۱	۸/۶۱	۸/۵۷	۸/۵۷	۸/۵۶	۸/۶۸	۸/۵۷	۸/۶۳	۸/۶۷	۸/۵۵
۶	۴/۶۰	۴/۶۹	۵/۲۰	۴/۶۶	۴/۳۳	۴/۴۷	۴/۹۴	۴/۵۳	۴/۶۷	۵/۲۹	۴/۸۶	۵/۱۰
۷	۳/۳۱	۳/۹۹	۳/۵۳	۳/۷۳	۳/۲	۳/۴۷	۳/۵۲	۴/۱۰	۳/۲۸	۳/۸۵	۴/۰۸	۳/۶۵
۸	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۳۴	۱/۲۸	۱/۱۶	۱/۲۲	۱/۲۶	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۴۱	۱/۴۴	۱/۲۹
۹	۰/۴۵	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۵	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۷	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۵۸	۰/۴۸
۱۰	۱۸/۴۷	۱۷/۵۸	۱۸/۱۱	۱۸	۱۸/۸۲	۱۸/۳۸	۱۸/۱۷	۱۷/۵۴	۱۸/۵۳	۱۷/۶۳	۱۷/۴۷	۱۸/۰۱
۱۱	۴/۲۲	۴/۰۱	۴/۰۲	۴/۰۶	۴/۳۰	۴/۱۷	۴/۰۹	۳/۹۲	۴/۱۸	۳/۹	۳/۸۹	۴/۰۴
۱۲	۲/۳۳	۳/۶۲	۲/۲۲	۳/۰۳	۲/۳۳	۲/۷۱	۲/۵۶	۳/۵۷	۲/۱۰	۲/۷۳	۳/۳۳	۲/۶۹
۱۳	۳/۹۶	۳/۷۱	۴/۰۸	۳/۹۶	۴/۰۹	۴/۰۳	۳/۹۴	۴/۰۹	۴/۰۹	۳/۹۳	۳/۹۴	۴/۰۹
۱۴	۲۲/۲۵	۲۱/۱۵	۲۱/۰۹	۲۱/۳۸	۲۲/۶۲	۲۱/۹۱	۲۱/۵۲	۲۰/۶۲	۲۲/۰۱	۲۰/۴۹	۲۰/۴۳	۲۱/۲۴

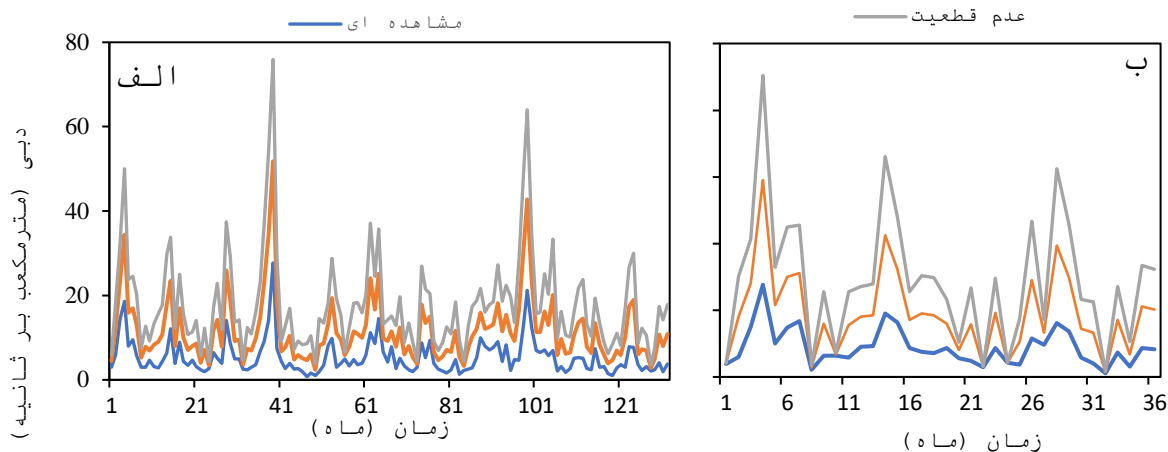
واسنجی و اعتبارسنجی رواناب

بر اساس نقشه‌های خاک منطقه‌ای، در مرحله واسنجی مقادیر ضرایب NSE و R2 به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۷۴ و بر اساس نقشه‌های خاک جهانی این ضرایب به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۶۴ به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز بر اساس نقشه‌های خاک منطقه‌ای مقادیر ضرایب NSE و R2 به ترتیب ۰/۵۹ و ۰/۷۶ و بر اساس نقشه‌های خاک جهانی این ضرایب به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۷۵ به دست آمد (جدول ۶). این نتایج بر توانایی بهتر مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب با استفاده از داده خاک منطقه‌ای در مقایسه با داده خاک جهانی دلالت داشت. از طرفی به دلیل قرابت نتایج معیارهای ارزیابی از جمله نتایج آماره NSE می‌توان قابلیت مدل در شبیه‌سازی رواناب را با استفاده از داده جهانی خاک نیز رضایت‌بخش توصیف کرد.

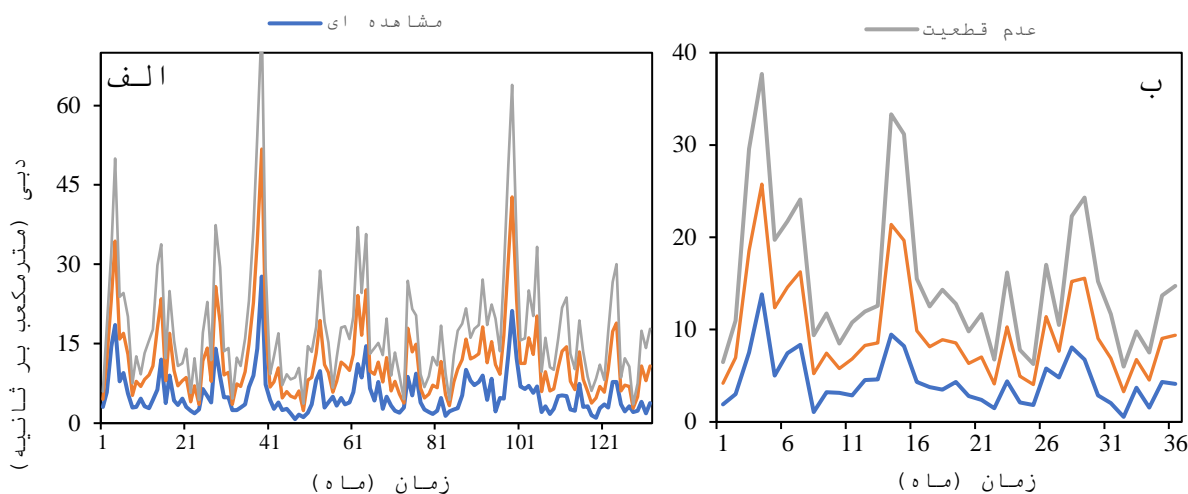
جدول ۶. مقایسه معیار ارزیابی مدل طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

معیار ارزیابی	نقشه خاک منطقه‌ای		نقشه خاک جهانی	
	دوره واسنجی	دوره اعتبارسنجی	دوره واسنجی	دوره اعتبارسنجی
NSE	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۲
R ²	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۷۵

در شکل ۵، مقادیر رواناب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، در حوزه آبخیز تالار ارائه شد. علیرغم بهبود عملکرد مدل SWAT در حوزه آبخیز تالار در حین واسنجی و اعتبارسنجی (با هر یک از دو نقشه خاک)، دبی پیش‌بینی شده در خروجی بیشتر از مشاهده شده بود.



شکل ۵. جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دوره واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب) با استفاده از نقشه خاک منطقه



شکل ۶. جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دوره واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب) با استفاده از نقشه خاک جهانی

بحث

شبیه‌سازی داده‌های خاک جهانی و منطقه‌ای نشان داد که آماده‌سازی پایگاه داده منطقه‌ای خاک سهم قابل توجهی در خروجی به دست آمده قبل و بعد از واسنجی SWAT فراهم می‌کند. به همین دلیل تفاوت‌های قابل توجه در دو پایگاه داده خاک، که به طور مستقیم بر نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بسته به هدف تحقیق تأثیر می‌گذارد، برای ارزیابی جریان حیاتی است. قابل توجه‌ترین تفاوت‌ها در دو پایگاه داده، بافت خاک است. در حالی که مقادیر بافت خاک (شن، سیلت و رس) تقریباً به طور مساوی در نقشه جهانی (FAO) توزیع شد، در نقشه خاک منطقه، مجموع محتوای ماسه و سیلت تقریباً ۸۰ درصد را تشکیل داد. دلیل اصلی تفاوت این بود که کل حوضه مورد مطالعه تنها در چهار نوع خاک در پایگاه داده FAO در برابر ۵۹ نوع خاک منطقه یکپارچه شده بود. در حوزه آبخیز تالار، تبخیر (هم تبخیر و تعرق از گیاهان و هم تبخیر از آب‌های زیرزمینی کم عمق) نسبتاً افزایش یافت. علاوه بر این، نفوذ به آب‌های زیرزمینی عمیق از ۱۲/۱۴ به ۱۵/۱۳ میلی‌متر در نقشه خاک منطقه افزایش یافت و در نقشه خاک جهانی ۱۷/۴۴ به ۲۰/۱ افزایش یافت (جدول ۴). دبی در خروجی حوزه آبخیز تالار عمدتاً به دلیل افزایش تبخیر-تعرق محصول، بوته و جنگل‌ها کمتر بود. مجموع تبخیر حوضه در دوره واسنجی در نقشه خاک منطقه‌ای و جهانی به ترتیب ۴۶/۶۴ و ۴۰/۹۴ درصد بارندگی را به خود اختصاص داد. همچنین سهم تولید رواناب هر یک از زیر حوضه‌ها در جدول ۵ ارائه شد. همچنین نتایج حاصل از جدول ۵ نشان داد که در تمامی سال‌های شبیه‌سازی بیشترین و کمترین درصد تولید رواناب خروجی حوزه آبخیز تالار به ترتیب به زیر حوضه‌های شماره ۱۴ و ۹ مربوط بود. این نتایج در تطبیق با نقشه کاربری بیان داشت که بیشترین سهم تولید رواناب در اراضی چراگاه تابستانه به دلیل فقر پوشش گیاهی بود، اما در مقابل مناطق جنگلی واقع در زیر حوضه شماره ۹، کمترین سهم و مشارکت را در تولید رواناب داشت. دبی در دو حوضه نیز با استفاده از مدل SWAT با دو نقشه خاک با پیچیدگی متفاوت پیش‌بینی شد.

به غیر از نقشه خاک مورد استفاده، دبی در خروجی حوضه آبخیز قبل از واسنجی مدل بیش از حد پیش‌بینی شد. پس از واسنجی نیز، دبی در حوضه آبخیز مورد مطالعه بیش از حد پیش‌بینی شد (شکل‌های ۵ و ۶). از طرفی با توجه به الزامات برنامه‌ریزی دولت‌ها در سطح منطقه‌ای، در حوضه‌های شهری و صنعتی که تهدید قابل توجهی برای منابع طبیعی حوضه است، فعالیت‌هایی مانند ساخت‌وساز و تغییر کاربری که به طور مستمر در چنین حوضه‌هایی انجام می‌شود، مستقیماً بر

نقاط اوج سیل در آب‌های سطحی تأثیر می‌گذارد و از تغذیه آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کند (Ogden et al. 2011). از طرف دیگر این فعالیت‌ها بر هدر رفت پوشش خاک و در نتیجه فرآیندهای هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارند، اندازه‌گیری کمی واکنش حوضه قبل از انجام این فعالیت‌ها، مبنای اساسی برای اقدامات انجام‌شده خواهد بود. بر این اساس، مطابق شکل ۵، علیرغم بهبود عملکرد مدل در حوزه آبخیز تالار در حین واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT (با استفاده از نقشه خاک منطقه)، دبی پیش‌بینی‌شده (شبیه‌سازی‌شده) در خروجی بیشتر از مشاهده‌ای بود. به طوری که در دوره واسنجی نسبت به دوره صحت‌سنجی، مدل دبی اوج را بسیار بهتر پیش‌بینی کرد. فقط در سال اول شبیه‌سازی، دبی کمتر پیش‌بینی شد. همچنین، بر اساس شکل ۶، مدل با استفاده از نقشه خاک جهانی در مقایسه با نقشه خاک منطقه، دبی را بیش برآورد کرد. لذا نقشه خاک جهانی در مقایسه با نقشه خاک منطقه در مدل SWAT دقت کمتری را نشان داد. البته مطابق آنچه در جدول ۳ ذکر شد، تفاوت‌های جزئی غیرقابل‌توجهی در عملکرد نقشه‌های خاک مورد استفاده (منطقه‌ای و جهانی) وجود داشت: شبیه‌سازی‌های نقشه خاک منطقه‌ای در دبی حوضه رودخانه ($R^2=0.74$) در مقایسه با ($R^2=0.64$) دقیق‌تر و بهترین دبی را ارائه کرد. مهم‌ترین دلیل این امر این است که تعداد پارامترهای خاک مورد تجزیه و تحلیل در این مطالعه بیشتر بود.

در این تحقیق، نتایج شبیه‌سازی روی تأثیر نقشه خاک جهانی مورد استفاده بر پیش‌بینی جریان برای حوزه آبخیز تالار با سایر مطالعات (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱؛ کوو و همکاران، ۱۹۹۹؛ بولواد و مادراموتوو، ۲۰۱۳) و با جزئیات ناچیز اطلاعات خاک، مطابق بود. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نیز در تطابق با دیگر یافته‌ها (چاپلوت، ۲۰۰۵؛ بوسا و همکاران، ۲۰۱۲؛ آدِم و همکاران، ۲۰۲۰) نشان داد که استفاده از اطلاعات خاک با وضوح خوب (همچون نقشه خاک منطقه‌ای) می‌تواند پیش‌بینی جریان را بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از اطلاعات خاک حاصل از نقشه خاک منطقه‌ای و جهانی برای ارزیابی اثر نمایش داده‌های خاک و تنوع مکانی استفاده شد. پیش‌بینی جریان در قالب شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام شد. این مدل به دلیل ساختار حمایتی گسترده‌ای که دارد، در کشورهای در حال توسعه به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با توجه به اینکه نقشه خاک منطقه‌ای، کلاس‌های بیشتری از خاک قابل دسترس را دارا بود، مدل کارایی بهتری را ارائه داد و این موضوع در تطابق با یافته‌های محققین دیگر (رضائی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹؛ ۱۳۵؛ آدِم و همکاران، ۲۰۲۰؛ ۱۴) بود. جهت تجزیه و تحلیل نتایج، از معیارهای ارزیابی ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب تعیین R^2 استفاده شد. قبل از واسنجی مدل، مؤلفه تبخیر-تعرق (به جز بقیه مؤلفه‌های رواناب سطحی، جریان جانبی و غیره) کاهش یافت. پس از واسنجی مدل بر اساس نقشه خاک منطقه‌ای ($NSE=0.56$) و ($R^2=0.74$) و جهانی ($NSE=0.56$ و $R^2=0.64$) و در مرحله صحت‌سنجی نیز طبق نقشه خاک منطقه‌ای ($NSE=0.59$ و $R^2=0.76$) جهانی ($NSE=0.62$ و $R^2=0.75$) برآورد گردید. بر این اساس، بین ضرایب به دست آمده در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. ضرایب به دست آمده، کارایی مدل در جهت شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز تالار را به خوبی نشان داد. این نتایج در تطابق با تحقیقات پیشین، قابل قبول ارزیابی شد (خسروی، ۱۴۰۱؛ ۱۳۵؛ آدِم و همکاران، ۲۰۲۰؛ ۱۰). نتایج حاصل از آنالیز تجزیه و تحلیل حساسیت، پارامتر ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL_AWC) را به عنوان حساس‌ترین پارامتر در نظر گرفت. نتایج حاکی از آن بود که استفاده

از اطلاعات خاک منطقه با جزئیات مکانی بیشتر، به‌طور قابل‌توجهی بر پیش‌بینی جریان تأثیری نداشت و می‌توان در صورت عدم دسترسی به این اطلاعات، از اطلاعات نقشه جهانی استفاده کرد. اطلاعات اضافی که در نقشه خاک منطقه‌ای ارائه شد، اگرچه توانست پارامترهای بهینه‌شده در مدل را تغییر دهد، اما بر جریان خروجی حوضه تأثیری نداشت.

تشکر و قدردانی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- خسروی، مهین؛ ذوالفقاری، علی‌اصغر؛ کابلی، سید حسن و غفاری، حیدر. (۱۴۰۱). بررسی کارایی مدل SWAT در تحلیل مکانی رواناب در حوزه‌های آبخیز فاقد داده‌های محلی خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دامغان رود). *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۰ (۱)، ۱۴۳-۱۲۹.
- رضازاده، محمد سهیل؛ بختیاری، بهرام؛ عباسپور، کریم؛ احمدی، محمدمهدی. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر-تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل SWAT. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲ (۴۰)، ۵۱-۴۱.
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ مختاری، داود و شفیعی‌مهر، مجید. (۱۴۰۰). واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبریز شهر چای میانه. *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵ (۷۶)، ۱۲۹-۱۳۹. doi: 10.22034/GP.2020.40775.2656.
- سرای، بهناز؛ طالبی، علی؛ مزیدی، احمد و پرویزی، سارا. (۱۳۹۹). اولویت‌بندی حوزه آبخیز سردآبرود از نظر سیل‌خیزی با استفاده از مدل SWAT. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۹ (۲۳)، ۸۵-۹۸. doi: 10.22111/JNEH.2019.29033.1500.
- سهرابی‌زاده، زهرا؛ شریفی‌مقدم، احسان و حکیم‌زاده، محمدعلی. (۱۳۹۷). تحلیل روند تغییرات کیفیت آب حوزه آبخیز رودخانه تالار با استفاده از روش ناپارامتری من-کندال. *فصلنامه اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۸ (۳)، ۱-۲۰.
- غلامی، عباس؛ شاهدی، کاکا؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ وفاخواه، مهدی و سلیمانی، کریم. (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی مدل نیمه‌توزیعی SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای (مطالعه موردی حوزه آبخیز تالار استان مازندران). *تحقیقات آب‌و‌خاک ایران*، ۴۸ (۳)، ۴۶۳-۴۷۶. doi: 10.22059/IJSWR.2017.63414.
- فرخزاده، بهنوش؛ ایلدرمی، علیرضا؛ عطایان، بهناز و نوروزی، مهناز. (۱۳۹۴). ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر میزان بار معلق با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز یلفان - استان همدان). *مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۵: ۳ (۱۹)، ۴۶-۲۸.
- کاوایان، عطاله و محمدی، مازیار. (۱۳۹۸). اثر دقت مکانی مدل‌های رقمی ارتفاعی بر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۰ (۱۹)، ۳۶-۴۵. doi: 10.29252/jwmmr.10.19.36.
- گلشن، محمد؛ اسمعیل‌عوری، ابادر و خسروی، خبات. (۱۳۹۷). ارزیابی حساسیت به سیل حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل نسبت فراوانی احتمالاتی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۷ (۱۵)، ۱-۱۶. doi: 10.22111/JNEH.2017.3120.
- محسنی، بهروز؛ شاهدی، کاکا؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود و درزی نفتچالی، عبدالله. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی کمی منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت بهشهر - بندرگز با استفاده از مدل SWAT. *نشریه حفاظت منابع آب‌و‌خاک*، ۱۰ (۴)، ۱۰۹-۱۲۶. doi: 10.30495/WSRCJ.2021.18084.
- مرادی، ایوب؛ نجفی‌نژاد، علی؛ اوتق، مجید و کمکی، چوقی‌بایرام. (۱۳۹۸). بررسی اثر انواع مدل‌های رقمی ارتفاعی در برآورد دبی

و بار معلق با استفاده از مدل SWAT، مطالعه موردی: آبخیز گالیکش استان گلستان. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و

مدیریت آبخیز، ۱۱ (۱)، ۶۲-۷۵. doi:10.22092/ijwmse.2019.118433.75-62

یوسفی، صالح؛ مرادی، حمیدرضا؛ تلوری، عبدالرسول و وفاخواه، مهدی. (۱۳۹۹). اثر پوشش گیاهی نگه‌دارنده بر ریخت‌سنجی و

ریخت‌شناسی بخش شریانی رودخانه تالار. *اکوهیدرولوژی*، ۱ (۲)، ۹۹-۱۱۰. doi: 10.22059/IJE.2014.53546

References

- Abbaspour, K.C. (2011). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. Eawag: *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, 100 pp.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. & Klove, B. (2015). A Continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
- Adem, A.A., Dile, W.T., Worqlul, A.W., Ayana, E.K., Tilahun, S.A., Steenhuis, T.S. (2020). Assessing Digital Soil Inventories for Predicting Streamflow in the Headwaters of the Blue Nile. *Hydrology*, 7 (8), 1-19. doi: 10.3390/hydrology7010008.
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M., Srinivasan, J., Santhi, R. C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M., Kannan, W.N., & Jha, M.K. (2012). SWAT: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491-1508. doi: 10.13031/2013.42256.
- 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(1), 73-89. doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- Boluwade, A., & Madramootoo, C. (2013). Modeling the impacts of spatial heterogeneity in the castor watershed on runoff, sediment, and phosphorus loss using SWAT: I. Impacts of spatial variability of soil properties. *Water, Air, Soil Pollution*, 224, 1692. doi: 10.1007/s11270-013-1692-0.
- Bossa, A., Diekkrüger, B., Igué, A., & Gaiser, T. (2012). Analyzing the effects of different soil databases on modeling of hydrological processes and sediment yield in Benin (West Africa). *Geoderma*, 173, 61-74. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.01.012.
- Chaplot, V. (2005). Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology*, 312, 207-222. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.017.
- Farrokhzadeh, B., Ildoromi, A., Ataeian, B., & Nourouzi. (2016). Evaluation of the Effects of Land Use Changes on Suspended Load Using SWAT Model (Case Study: Yalfan Watershed, Hamedan Province). *Environmental Erosion Research*, 5: 3 (19), 28-46. [In Persian]
- Gholami, A., Shahedi, K., Habibnejad Rooshan, M., & Vafakhah, M., & Soleimani, K. (2017). Assesment About Efficiency of SWAT Semi-Distribution Model for Simulation of Streamflow (Case Study in Talar Watershed, Mazandaran Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48 (3), 463-476. doi: 10.22059/IJSWR.2017.63414. [In Persian].
- Golshan, G., Esmali Ouri, A., & Khosravi, Kh. (2018). Flood Susceptibility assessments Using Frequency Ratio model in Talar Watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7 (15), 1-16. doi: 10.22111/JNEH.2017.3120. [In Persian].
- Hargreaves, G., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applid Engineering Agriculture*, 1(2), 96-99. doi: 10.13031/2013.26773.
- Kavian, A., & Mohammadi, M. (2019). Effects of Digital Elevation Models (DEM) Spatial Resolution on Hydrological Simulation. *Journal of Watershed Management Research*, 10 (19), 36-45. doi: 10.29252/jwmr.10.19.36. [In Persian].
- Khosravi, M., Zolfaghari, A.A., Kaboli, S.H., & Ghafari, H. (2022). Investigation of SWAT model efficiency in spatial analysis of runoff in watersheds without local soil data (Case

- Study: Damghanrood Watershed). *Applied Soil Research*, 10 (1), 129-143. [In Persian]
- Kuo, W.L., Steenhuis, T.S., McCulloch, C.E., Mohler, C.L., Weinstein, D.A., DeGloria, S.D., & Swaney, D.P. (1999). Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model. *Water Resources Research*, 35, 3419–3428. doi: 10.1029/1999WR900183.
- Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 81(2), 137-142. doi: 10.1016/j.still.2004.09.002.
- Mohseni, B., Shahedi, K., Habibnejad-Roshan, M., & Darzi-Naftchali, A. (2021). Quantitative simulation of surface water and groundwater resources in Behshahr - Bandar-e-Gaz Plain using SWAT model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)*, 10 (4), 109-126. doi: 10.30495/WSRCJ.2021.18084. [In Persian].
- Mohseni, B., Shahedi, K., Habibnejad-Roshan, M., & Darzi-Naftchali, A. (2022). Improving groundwater sustainability through conservation strategies in a critical-prohibited coastal plain. *Physics and Chemistry of the Earth*, 127, 103176. doi: 10.1016/j.pce.2022.103176.
- Moradi, A., Najafinejad, A., Ownegh, M., & Komaki, Ch. B. (2019). Assessment of the impacts of different Digital Elevation Models on runoff and suspended sediment estimations using SWAT model, case study: Galikesh Watershed, Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 11 (1), 62-75. doi:10.22092/ijwmse.2019.118433. [In Persian].
- 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. doi: 10.13031/2013.23153.
- Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual, models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. doi: 10.1016/0022-1694 (70) 90255-6.
- Oeurng, C., Sauvage, S., & Sanchez-Perez, J. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401, 145–153. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.017.
- Ogden, F., Pradhan, N., Downer, C., & Zahner, J.A. (2011). “Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment.” *Water Resources Research*, 47 (12). doi:10.1029/ 2011WR010550.
- Oruç, H.N., Çelen, M., Güngen, F., Öncel, M.S., Vural, S., & Kılıç, B. (2022). Evaluating the effects of soil data quality on the SWAT runoff prediction Performance; A case study of Saz-Cayırova catchment, Turkey. *Urban Water Journal*, 19, 1-16. doi: 10.1080/1573062X.2022.2056060.
- 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. *Quarterly Journal of Geography and Planning*, 25 (76), 129-139. doi: 10.22034/GP.2020.40775.2656. [In Persian].
- Rezazdeh, M.S., Bakhtiari, B., Abbaspour, K & Ahmadi, M.M. (2018). Simulation of Runoff, Sediment and Evapotranspiration through Management Scenarios to Reduce Sediment Load Using SWAT Model. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 12 (40), 41-51. [In Persian]
- Saraie, B., Talebi, A., Mazidi, A., & Parvizi, S. (2020). Prioritization of Sardab-Rood watershed from flooding viewpoint using the SWAT model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 23 (9) , 85-98. doi: 10.22111/JNEH.2019.29033.1500. [In Persian].
- Sohrabzadeh, Z., Sharifi Moghadam, E., & Hakimzadeh, M.A. (2018). Trend Changes Analysis of the Water Quality in the Talar River Watershed Using the Man-Kendall (MK) Test. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 9 (3), 1-20. [In Persian]
- Yusefi, S., Moradi, H.R., Talori, A., & Vafakhah., M. (2014). Effect of Riparian Vegetation on Morphometric and Morphological Indexes in Braided Part of Talar River. *Ecohydrology*, 1 (2), 99-110. doi: 10.22059/IJE.2014.53546. [In Persian].