



Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam^{a*}, Fariba Karami^b, Kolsom Abazari^c

^a Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^b Professor in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

^c PhD in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

ARTICLE HISTORY

Received :30 November 2023

Received in revised form:
30 March 2024

Accepted :19 April 2024

Available online :
21 March 2025

Keywords:

RUNOFF SIMULATION,
SWAT MODEL, SMAR
MODEL, SUFI-2
ALGORITHM, NASH-
SUTCLIFFE
EFFICIENCY,
COEFFICIENT OF
DETERMINATION (R^2),
OJAN CHAY BASIN,
HYDROLOGICAL
MODELING

ABSTRACT

One of the most important solutions for the principled and correct management of water and soil in basins is to use hydrological models for simulation of rainfall-runoff processes, which estimate and predict the components of the water balance, including runoff, evaporation, transpiration, and infiltration, especially in basins without data or with incomplete data. In this study, the water balance of Ojan Chai basin was simulated by the SWAT semi-distributed and SMAR models for 20 years (2002-2021). The SUFI-2 algorithm was used in the SWAT model and the genetic algorithm optimizer was used in the SMAR model for calibration (2005 to 2016) and validation (2017 to 2021).

The simulation results in the calibration phase with the objective functions of the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and RSR were equal to 0.80, 0.81, and 0.45, respectively, and for validation, 0.74, 0.75, and 0.51, respectively, which indicates the high efficiency of the model in simulating the water balance. For the SMAR method, the Nash-Sutcliffe coefficients (NSE) and R^2 were obtained as 0.60 and 0.56 in calibration and 0.625 and 0.67 in validation.

Both of these models perform better in simulating the baseflow and average flow rates than the maximum flow rates; however, the matching of the simulated flow rate with the observed flow rate in the SWAT model is superior to that of the SMAR model, which is due to the consideration of spatial changes in this type of model. Considering the very good performance results of the models, it is suggested that they be used in watershed protection measures and water and soil management.

*Corresponding author :Dr.Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam

E-mail address: Rezmogh@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Rezaei Moghaddam, M. H., Karami, F., & Abazari, K. (2025). Evaluation of Semi-distributed (SWAT) and Lumped (SMAR) Hydrological Models in Rainfall-runoff Estimation and Simulation, Case Study: Ojan chay drainage basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp.123-150, DOI:https://doi.org/10.22067/geoech.2024.85638.1436



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

One of the most fundamental natural processes of basins is the hydrological process. Estimating and predicting hydrological balance components, including runoff, evapotranspiration, and infiltration, are important in basins. Protecting water and soil resources is an important strategy for managing basins. Hydrological models are one strategy used to simulate rainfall-runoff processes. Rainfall-runoff models can interpolate and extrapolate flow according to the input data to the model. Hydrological models can be classified into lumped, semi-distributed, and distributed types because of differences in basin simulation structure. Among the lumped models, we can mention the RRL software model series, which includes AWBM, SIMHYD, TANK, SMAR, and SACRAMENTO, and the SWAT model is the semi-distributed model with the highest usage. The Ojan Chay basin, located in Bostanabad County (East Azerbaijan Province), is one of the main sub-basins of the Aji Chay River. Due to its topographic features, semi-arid climate, and soil type, it is one of the important pastures of the Sahand Mountains and the location of various rainfed and irrigated crops. The purpose of this study is to evaluate and simulate rainfall-runoff over 20 years by using the lumped SMAR model and the semi-distributed SWAT model.

Material and Methods

The data required for this study includes topographic maps, soil maps, 30-meter DEM images, and land use maps. Rainfall data was extracted from Bostanabad, Bashesiz-Ojan, Saeedabad, Zarnak, Saray, Ghoshchi, Zinjanab, and Hashtrood weather stations. Synoptic stations in Bostanabad, Ahar, Sarab, Sahand, Mianeh, and Maragheh were used to extract minimum temperature, maximum temperature, wind speed, relative humidity, and evapotranspiration. Calibration and validation of the models were achieved by using discharge data from Bostanabad station during the period 2002-2021. SWAT and SMAR models were utilized in this study. In the SWAT model, the basin was first divided into sub-basins and hydrological response units (HRUs) by using DEM image, land use, slope, and soil maps, and data from weather stations in ArcMap environment. The SWAT-CUP software was utilized to simulate rainfall-runoff by extracting the model output. The SMAR model requires less input data than SWAT. In this model, monthly rainfall and evapotranspiration data from synoptic stations, as well as monthly discharge data from the Bostanabad hydrometric station, were entered. Genetic algorithm and related parameters were used to simulate rainfall-runoff. To evaluate the efficiency and accuracy of these models in the calibration and validation, the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) were used.

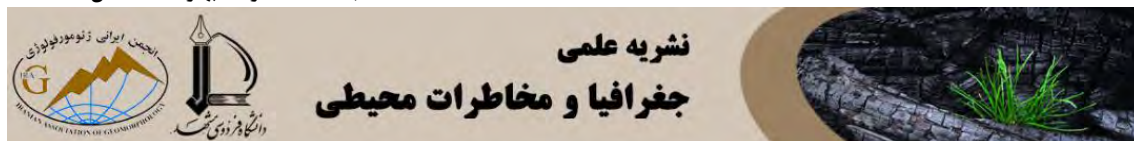
Results and Discussion

Land use, slope, and soil were used to extract 13 sub-basins and 157 hydrological response units in the SWAT model. The model output was entered into SWAT-CUP software. The warm-up period was defined as the first 3 years of the statistical period 2002-2021. To determine the sensitivity of the parameters that affect runoff, the SUFI-2 algorithm was used. Sensitivity analysis was carried out for 26 parameters in the statistical period from 2005 to 2016 through monthly discharge data of the Bostanabad

hydrometric station. According to the results, out of the 26 selected parameters, only 12 parameters were sensitive and effective and were included in the model with the range of their changes. The model was calibrated by using the new optimal values of the parameters for the statistical period 2005 to 2016 at monthly time scale to obtain the best values of the objective functions. By applying the optimized parameters in the calibration, Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) were obtained as 0.80, 0.81, and 0.45, respectively. The results in the calibration were in a very good range. For the validation, monthly discharge data during 2017 to 2021 were entered into the model. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and RSR were 0.74, 0.75, and 0.51, respectively, which indicate the ability of the SWAT hydrological model to simulate the discharge of the Ojan Chay basin. In the SMAR model, monthly rainfall and evapotranspiration data from synoptic stations and monthly discharge data from Bostanabad hydrometric station were entered into the model according to the software format. Genetic algorithm and parameters related to water balance and flow routing were used to simulate rainfall-runoff. The model was calibrated in the statistical period 2005-2016 and validated in the statistical period 2017-2021, and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) were considered to evaluate the performance of the SMAR model. The Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) in calibration (0.60 and 0.56) and validation (0.625 and 0.67) indicate the acceptable performance of the SMAR model. Like the SWAT model, the SMAR model has simulated the base and average discharge values well, but it has not simulated the maximum discharges well.

Conclusion

In this study, the physical and semi-distributed SWAT model and the lumped SMAR model were used to simulate the runoff of the Ojan Chay drainage basin over a 20-year period. The performance of the hydrological models was evaluated by Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and ratio of standard deviation of observations to root mean square error (RSR) during the calibration and validation periods. The results showed that both models performed well in average and base discharges. One of the weaknesses of both models was the inappropriate estimation of peak discharges and extreme events. The lack of required data (rainfall, minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, etc.), the lack of proper data recording by the relevant organization, the need for a large amount of data in SWAT, etc. are all the reasons that reduce the accuracy of these models. Generally, it can be said that although both models have good evaluation in runoff simulation during the calibration and validation periods, the performance of the SWAT model shows its superiority over the SMAR model, due to the high values of the Nash-Sutcliffe efficiency and R^2 in both calibration and validation.



ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی (SWAT) و یکپارچه (SMAR) در برآورد و شبیه‌سازی بارش-رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز اوجان‌چای

محمدحسین رضایی مقدم^{۱*}، فریبا کرمی^۲، کلثوم اباذری^۳

^۱استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳دانش آموخته مقطع دکترای ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۳۱	یکی از راهکارهای مهم مدیریت اصولی و صحیح آب و خاک در حوضه‌های آبریز، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی فرایندهای بارش-رواناب است که تخمین و پیش‌بینی مولفه‌های بیلان آبی از جمله رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ را خصوصا در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص امکان‌پذیر می‌کند. در این پژوهش بیلان آبی حوضه آبریز اوجان‌چای در طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۲-۲۰۲۱) با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT و مدل یکپارچه SMAR شبیه‌سازی شد. در مدل SWAT از الگوریتم SUFI-2 و در مدل SMAR از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک، جهت واسنجی (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱) بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی SWAT در مرحله واسنجی با توابع هدف ضرایب نش‌ساتکلیف R^2، (NSE) و RSR به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۱ و ۰/۴۵ و برای اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۵۱ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی بیلان آبی حوضه آبریز است و در روش SMAR ضرایب نش‌ساتکلیف R^2، (NSE) در واسنجی ۰/۶۰، ۰/۵۶ و در اعتبارسنجی ۰/۶۲۵، ۰/۶۷ بدست آمد. هر دوی این روش‌ها در شبیه‌سازی دبی‌های پایه و متوسط نسبت به دبی‌های حداکثری عملکرد بهتری دارند ولی با این حال تطابق دبی شبیه‌سازی شده با دبی مشاهداتی در مدل SWAT نسبت به SMAR برتری دارد که علت آن در نظر گرفتن تغییرات مکانی در این نوع از مدل‌ها است. لذا با توجه به نتایج خیلی خوب کارایی مدل‌ها، پیشنهاد می‌شود از آن در اقدامات حفاظتی حوضه‌ها و مدیریت آب و خاک استفاده شود.
کلمات کلیدی: شبیه‌سازی رواناب مدل SWAT مدل SMAR الگوریتم SUFI-2 کارایی نش-ساتکلیف ضریب تعیین (R^2) حوضه آبریز اوجان‌چای مدل‌سازی هیدرولوژیکی	

مقدمه

فرآیندهای هیدرولوژیکی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرآیندهای طبیعی هر حوضه‌آبریز است (Mansouri & Pirmoradian, 2019). شناسایی و به مدل درآوردن رفتار رودها و شریان‌های آبی جهت برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و استفاده بیشتر و بهتر از پتانسیل‌های آن عمیقاً احساس می‌شود. بطوریکه عدم وجود تشکیلات منسجم به منظور ثبت تغییرات سیستم هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور، قرار گرفتن بیشتر رودها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، همه و همه دلایل بیشتر و ظریف‌تری می‌باشد که به مقوله شبیه‌سازی و پیش‌بینی، جلوه و نمودی کامل‌تر می‌بخشد (Karami, Bayati khatibi & Ganbari, 2016). تخمین و پیش‌بینی مولفه‌های بیلان هیدرولوژیکی از جمله رواناب، تبخیر و تعرق و نفوذ در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است (Shafiei & Gharari, 2018).

با توجه به شرایط موجود در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور از لحاظ کمبود آمار، پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم امکان شناخت کامل آن‌ها استفاده از روش‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (Fazeli Thani, Motamed Vaziri & Gaderi, 2016) و حفاظت از منابع آب و خاک از جمله راهکارهای مهم مدیریت اصولی و صحیح حوضه‌های آبریز است (Rezaei Mogadam, Hejazi & Behbody, 2018).

یکی از این راهکارها، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب است. مدل‌های بارش-رواناب قابلیت درون‌یابی و برون‌یابی جریان را متناسب با داده‌های ورودی به مدل را دارند (Memgistu, 2009). مدل‌های زیادی برای شرح و پیش‌بینی هیدرولوژی حوضه‌آبریز پیشنهاد شده‌است که از نظر اهداف و مقیاس زمانی و مکانی بسیار متفاوت هستند (Setegn, Dargahi, Srinivasan & Melesse, 2010). مدل‌های هیدرولوژیکی براساس تفاوت در ساختار شبیه‌سازی حوضه آبریز به انواع یکپارچه، نیمه‌توزیعی و توزیعی تقسیم می‌شوند. از جمله مدل‌های یکپارچه می‌توان به سری مدل‌های نرم‌افزار RRL اشاره کرد که شامل AWBM، SIMHYD، TANK، SMAR و SACRAMENTO است و از مدل‌های نیمه‌توزیعی پرکاربرد، مدل SWAT¹ است. در رابطه با موضوع شبیه‌سازی بارش-رواناب براساس مدل‌های هیدرولوژیکی تحقیقات زیادی در سطح ایران و جهان صورت گرفته‌است از جمله: رستمی‌خلج و همکاران (Rostami Khalaj, 2016) ، Moghadamnia, Salmani & Sepahvand, 2016) در بررسی مقایسه‌ای مدل‌های SIMHYD ، SACRAMENTO، AWBM، TANK و SMAR در حوضه‌آبریز نوده نشان دادند که مدل AWBM نسبت به سایرین در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب کارایی بهتری دارد.

رشیدی و همکاران (Rashidi, Araghinrad & Ebrahimi, 2017) در شبیه‌سازی رواناب در شمال استان مرکزی با استفاده از مدل‌های WAPABA و SALAS به این نتیجه رسیدند که مدل WAPABA عملکرد بهتری در برآورد رواناب داشته است که علت آن در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای همه پارامترها است. شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز گاماسیاب توسط زارع‌زاده مهریزی و همکاران (Zarezade Mehrizi, Khorani, 2017) نشان داد که براساس نتایج نش‌ساتکلیف و R^2 در واسنجی و اعتبار سنجی، مدل SWAT توانسته شبیه‌سازی خوبی را ارائه دهد. شیخ‌گودرزی و همکاران (Shikh Gooderzi, 2018) در شبیه‌سازی دبی حوضه بابلرود با مقایسه روش‌های WBM، SIMHYD و Tank دریافتند که شبیه‌سازی در هر سه مدل در دبی‌های متوسط و حداکثری انطباق قابل قبولی داشته‌اند. مقایسه کارایی مدل‌های SIMHYD، AWBM، شبکه‌عصبی (MLP و RBF) در شبیه‌سازی رواناب حوضه بار اریه نیشابور توسط دستجردی و همکاران (Dastjerdi, Azarakhshi & Bashiri, 2019)، مطالعه دیگری است که نشان می‌دهد، روش SIMHYD در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب، ضرایب آماری (نش‌ساتکلیف، تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا) بهتری را ارائه کرده است. برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران‌چای توسط رضایی‌مقدم و همکاران (Rezaei Mogadam et al., 2018) نشان داد، الگوریتم SUFI-2 نسبت به GLUE در واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل برتر است. روستایی و همکاران (Roostaei, Ayaseh, 2020) در شبیه‌سازی دوبعدی جریان سیلابی رودخانه ليقوان با مدل Mike 11 به این نتیجه رسیدند که افزایش یا کاهش پوشش گیاهی بر ویژگی‌های جریان از نظر سرعت و عمق تاثیر معناداری دارد. سرایی و همکاران (Saraie, Talebi, Mazidi & Parvizi, 2020) در اولویت‌بندی حوضه آبریز سردآبرود از نظر تولید رواناب به روش SWAT نشان دادند که تولید رواناب و احتمال وقوع سیلاب در زیرحوضه‌های ۶، ۲۳، ۵، ۱۰ (با مرتع متوسط تا فقیر و مناطق مسکونی حاشیه رودخانه‌ها) بالاست. خاوریان و همکاران (Khavarian, 2020) با استفاده از مدل Temez و تاثیر سناریوهای مختلف بر کاربری اراضی در حوضه آبریز کوزه‌تپراقی نشان دادند که احداث باغ در مراتع شخم‌خورده و کم‌بازده کاهش رواناب و تبدیل مراتع پرشیب به زراعت دیم، افزایش رواناب را در پی خواهد داشت. رضایی‌مقدم و همکاران (Rezaei Moghadam, Mokhtari, 2021) در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه آبریز شهرچای میانه با در نظر گرفتن ضرایب آماری NSE و R^2 نشان دادند که الگوریتم SUFI-2 در شبیه‌سازی رواناب نسبت به رسوب عملکرد بهتری دارد. پرواز و شاهویی (Parvaz & Shahoei, 2022) در حوضه دریاچه ارومیه با مدل AWBM به این نتیجه رسیدند که در بازه زمانی مورد نظر بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انطباق بالایی وجود دارد که نشانگر قابلیت خوب مدل در پیش‌بینی رواناب منطقه است. رضوانی و همکاران (Rezvani, Ghorbani, 2023) با مقایسه مدل‌های SMAR، SIMHYD و SACRAMENTO در شبیه‌سازی رواناب در حوضه گالیکش استان گلستان دریافتند که مدل SACRAMENTO با ضریب بالای نش‌ساتکلیف در واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی بهتری از رواناب را ارائه داده است. آرخی و همکاران (Arekhi, karkaz & Emadodin, 2023) با استفاده از مدل SWAT در بررسی

تأثیر تغییرات اقلیمی در حوضه قره‌سو دریافتند که تغییرات اقلیمی باعث افزایش متوسط دبی سالانه و دبی‌های حداکثری و متعاقباً جریان‌های سیلابی شده‌است. لین و همکاران (Lin et al., 2015) در تحلیل تأثیرات کاربری اراضی بر رواناب در حوضه‌آبریز جین جیانگ^۱ در چین به این نتیجه رسیدند که افزایش مناطق شهری و جنگل‌زدایی از ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۶ باعث افزایش میزان رواناب شده‌است. کافاس و همکاران (Kaffas, Hrissanthou & Sevatas, 2018) در ارزیابی فرآیندهای هیدرومورفولوژیکی در حوضه کوهستانی نستوس^۲ شمال‌شرقی یونان با بکارگیری مدل ریاضی و SWAT نشان دادند که نمودار رواناب شبیه‌سازی شده هر دو مدل، الگوی مشابه و نزدیک به هم را دارند. سانگ و همکاران (Song, Shi, Yao & Zhang, 2019) در ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد مدل‌های SMAR، SACRAMENTO و TANK در چین به این نتیجه رسیدند که هر سه روش با ارائه ضرایب آماری بالا عملکرد خوبی در شبیه‌سازی رواناب دارند. احمدی و همکاران (Ahmadi, Moeini, Ahmadi, Motamedvaziri & Zehtabiyan, 2019) در شبیه‌سازی بارش-رواناب در ایران از طریق مقایسه تطبیقی مدل‌های SWAT، IHECRAS و ANN نشان دادند که عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی خوب بوده و مدل SWAT نسبت به IHECRAS عملکرد بهتری داشته‌است. لو و همکاران (Lv, Zuo & Rodriguez, 2020) در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب با استفاده از مدل‌های SWAT-ANN و SWAT-MLP/WOA در حوضه بالیقلوچای (ایران) دریافتند که مدل SWAT-MLP/WOA از نظر شاخص‌های آماری نش‌ساتکلیف، R^2 ، RMSE و RE عملکرد بهتری دارد. فرریرا و همکاران (Ferreira et al., 2021) در ارزیابی رواناب در برزیل نشان دادند که مدل SWAT توانایی بیشتری برای مدیریت و پیش‌بینی آینده سیستم هیدرولوژیکی نسبت به HEC-HMS دارد. گو و همکاران (Guo et al., 2022) با روش‌های مختلف درون‌یابی بارش و مدل‌های GR4J، IHACRES.MIK SHE و SACRAMENTO در حوضه چائوهه^۳ در چین نشان دادند که روش درون‌یابی ANUSPLIN و SACRAMENTO ارزیابی بهتری از شبیه‌سازی رواناب را دارند. رضانی و همکاران (Ramezani, Helfer & Yu, 2023) با استفاده از مدل SIMHYD تأثیرات شهرسازی و تغییرات اقلیمی بر رواناب را در استرالیا بررسی کردند و نتایج حاصل از ضرایب نش‌ساتکلیف و مقدار مطلق خطا در واسنجی و اعتبارسنجی رواناب شبیه‌سازی شده، رضایت‌بخش به‌دست آمد. ردی و همکاران (Reddy, Saravanan & Abijith, 2023) در زیرحوضه هم‌اواتی در هند با بکارگیری مدل‌های AWBM، SACRAMENTO و شبکه عصبی FFBPNN شبیه‌سازی رواناب برای دوره ۲۵ ساله را انجام دادند. نتایج ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب همبستگی در FFBPNN و AWBM نسبت به SACRAMENTO از نظر واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد خوبی دارند.

حوضه آبریز اوجان‌چای واقع در شهرستان بستان‌آباد (استان آذربایجان شرقی)، یکی از زیرحوضه‌های اصلی آبی‌چای است که با توجه به ویژگی‌های توپوگرافی، اقلیم نیمه‌خشک و نوع خاک، از چراگاه‌های مهم کوهستان سهند و محل محصولات مختلف دیمی و آبی است، لذا با توجه به اهمیت این حوضه و قرارگیری ۷۱ سکونتگاه

1 Jinjiang

2 Nestos

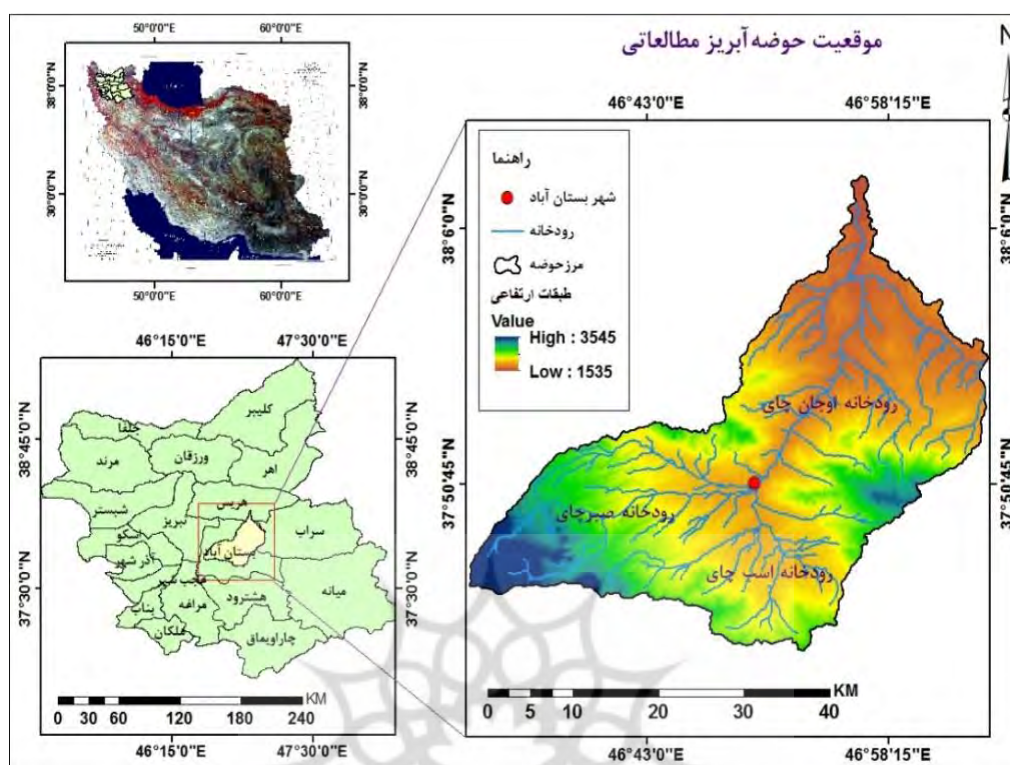
3 Chaohe

روستایی در آن، مطالعات متعددی در مورد این حوضه در رابطه با تغییرات کاربری اراضی، فرسایش و... انجام شده است و هدف پژوهش حاضر نیز ادامه این مطالعات و شبیه سازی بارش-رواناب در طی دوره ۲۰ ساله است. وجه تمایز این پژوهش با مطالعات قبلی، استفاده از مدل یکپارچه SMAR و کاربرد مقایسه‌ای مدل‌های نیمه توزیعی و یکپارچه در برآورد دبی جریان است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز اوجان‌چای که در منطقه شمال غرب کشور و در دامنه‌های شرقی کوهستان سهند قرار گرفته، از زیر حوضه‌های مهم آبی‌چای است که در موقعیت جغرافیایی $31^{\circ} 46'$ الی $3^{\circ} 47'$ طول شرقی و $37^{\circ} 44'$ الی $5^{\circ} 38'$ عرض شمالی واقع شده است این حوضه از غرب به حوضه‌ی آبریز سعیدآباد، از شرق به شهر شریبان، از جنوب به شهرستان هشت‌رود و از شمال به شهرستان هریس منتهی می‌شود و شامل دو زیر حوضه صبرچای و اسب‌چای است که در نزدیکی شهر بستان‌آباد به رودخانه اوجان‌چای می‌پیوندند. حداکثر ارتفاع آن در بخش جنوب و جنوب غربی یعنی بزداغ با ارتفاع ۳۵۴۰ متر قرار گرفته و حداقل ارتفاع آن در محل پیوست رودخانه اوجان‌چای به آبی‌چای دیده می‌شود (شکل ۱). حوضه‌ی آبریز مطالعاتی به مساحت ۱۰۸۲ کیلومتر مربع با متوسط دمای سالانه آن $13/5$ درجه سانتیگراد و میزان بارش سالانه بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی متر از نظر اقلیمی نیمه‌خشک است. در ماه‌های اردیبهشت حوضه بیشترین بارندگی را دریافت می‌کند و مرداد و تیر از خشک‌ترین ماه‌های سال محسوب می‌شوند (Bayati Khatibi & Karami, 2019b).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig.1. The study area

داده‌ها

داده‌های مورد نیاز در این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه خاک، تصاویر DEM ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی است. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ برای سال ۲۰۲۱ میلادی به روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و ضریب کاپای ۰/۸۵ در محیط نرم افزار ENVI تهیه شد. متناسب با ورودی مورد نیاز مدل SWAT در ۸ کلاس طبقه‌بندی شد. طبق لایه خروجی، کاربری جنگل در منطقه ناچیز و آنهم بصورت جنگل دست‌کاشت، کمتر از ۱ درصد را شامل می‌شود مراتع متراکم و نیمه متراکم و کم تراکم به ترتیب با ۱۲/۱۸، ۱۶/۵۱ درصد و ۴/۹۴ درصد از حوضه را دربرگرفته‌اند. بخش مهمی از کاربری‌ها، زمین‌های زراعی هستند بطوری‌که زراعت دیم و آبی و باغات مجموعاً ۶۴ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. از دیگر کاربری‌ها، سطوح آبی و مناطق مسکونی‌اند که عمدتاً روستاها و شهر Bastan آباد را شامل می‌شود و این مناطق ۲ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. برای استخراج داده‌های بارش از ایستگاه‌های بارانسنجی Bastan آباد، باشسیز او جان، سعیدآباد، زرنق، سراب، قوشچی، زینجناب، هشتروند استفاده شد. ایستگاه‌های سینوپتیک، Bastan آباد، اهر، سراب، سه‌پند، میانه و مراغه برای دمای حداقل، دمای حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و تبخیر و تعرق و... بکار گرفته شد و جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل از داده‌های هیدرومتری ایستگاه Bastan آباد در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۲۲ استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱- داده‌های مورد نیاز در مدل SWAT

Table 1-Data required in SWAT

دوره period	کاربرد Usage	توضیحات Explanations	داده Data
****	ورودی SWAT SWAT Input	سایت USGS USGS Site	مدل رقومی ارتفاعی DEM
****	ورودی SWAT SWAT Input	سایت FAO FAO Site	نقشه خاک Soil Map
2021	ورودی SWAT SWAT Input	سایت USGS (تصاویر ماهواره سنتینل ۲) USGS Site (Sentinel 2 satellite images)	نقشه کاربری اراضی Landuse Map
2002-2021	ورودی SWAT و SMAR SWAT & SMAR Input	سازمان هواشناسی National Meteorological Organization	داده‌های اقلیمی Climatic Dats
2002-2021	ورودی SWAT و SMAR SWAT & SMAR Input	سازمان آب منطقه‌ای Regional Water Company Of East Azarbaijan	داده‌های دبی Discharge data

مدل SWAT

مدل هیدرولوژیکی SWAT یک مدل بر مبنای فیزیکی و نیمه‌توزیعی که قادر به اجرا در مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه) است و عموماً برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رواناب، رسوب و مواد شیمیایی حاصل از کشاورزی با داده‌های ورودی در مقیاس حوضه آبریز است (Busico et al., 2020). در این مدل ابتدا حوضه آبریز به زیر حوضه‌هایی براساس نقشه‌های ارتفاعی (DEM) تقسیم و سپس با توجه به نقشه‌های خاک و کاربری اراضی به واحدهای واکنش هیدرولوژیک Hydrologic Response Unit (HRU) تقسیم می‌گردد. این مدل از روش‌های شماره منحنی اصلاح‌شده و گرین‌امپت^۱ برای تخمین رواناب سطحی استفاده می‌کند و روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگهام^۲ قابل محاسبه است (Neitsch, Arnold, Kiniry & Williams, 2005). در مدل SWAT تبخیر از خاک و گیاه به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق پتانسیل توسط روش‌های پنمن-مونتیت^۳، پرستلی تیلور و هارگریوز-سامانی^۴ می‌تواند صورت گیرد. چرخه هیدرولوژی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود براساس معادله (۱) بیان آب استوار است:

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

1 Soil Conservation Service & Green-Ampt

2 Muskingum

3 Monteith

4 Hargreaves & Samani

در این معادله SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک در یک متر از عمق خاک، SW_0 مقدار رطوبت اولیه خاک، t زمان به روز، R_{day} مقدار بارش در روز Δt به میلی‌متر، Q_{surf} مقدار عمق رواناب در روز Δt به میلی‌متر، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز Δt به میلی‌متر، W_{seep} مقدار نشت به میلی‌متر که روز Δt از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود و Q_{gw} مقدار آب بازگشتی در روز Δt بر حسب میلی‌متر است (Neitsch et al., 2005). بهینه سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم $SUFI-2^1$ نرم‌افزار SWAT-CUP انجام شد. در روش $SUFI-2$ یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام واسنجی سعی می‌شود پارامترها در این محدوده قرار گیرند که به آن دامنه عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌گویند. از آنجایی که اثر تمام عوامل عدم قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت تحلیل عدم قطعیت انجام شده، می‌باشد. عامل دیگری که در برآورد قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت بکار می‌رود، d-factor است. معیار d-factor برابر با فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیف ۹۵ درصد، تقسیم بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده است. شرایط ایده‌آل زمانی است که مقدار P-factor، به یک و d-factor به صفر نزدیک باشد. بعد از واسنجی، اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل در یک سری زمانی متفاوت از دوره واسنجی با واقعیت مقایسه می‌گردد. تنها تفاوت آن با واسنجی این است که هیچ تصحیحی روی پارامترها صورت نمی‌گیرد. در نهایت اعتبارسنجی، اعتمادپذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل و بازه‌های زمانی آینده تعیین می‌کند (Karami, Bayati Khatibi & Ganbari, 2017).

SMAR

نرم‌افزار RRL^۲ با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش، تبخیر و تعرق و دبی مشاهداتی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب ایجاد شده است. این نرم‌افزار حاوی پنج مدل بارش-رواناب AWBM، SIMHYD، SACRAMENTO، TANK و SMAR است. این مدل‌ها دارای ۷ مورد بهینه‌ساز به منظور واسنجی خودکار است: الگوریتم ژنتیک^۳، الگوی جست و جوی چندآغاز^۴، نمونه‌برداری تصادفی یکنواخت^۵، بهینه‌ساز با شروع چندگانه روزنبرگ^۶، تک آغاز روزنبرگ^۷، روش تکاملی به هم ریخته پیچیده^۸ و الگوی جست‌وجو^۹ است (Rezvani et al., 2023). مدل SMAR یک مدل مفهومی یکپارچه می‌باشد که رواناب سطحی، دبی آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق و نشت از پروفیل خاک را در سطح حوضه‌آبریز تخمین می‌زند. این مدل از دو مکانیسم

1 Sequential Uncertainty Fitting Version 2

2 Rainfall Runoff Library

3 Genetic Algorithm

4 Pattern Search Multi-Start

5 Uniform Random Sampling

6 Rosenbrock Multi-Start Optimiser

7 Rosenbrock Single Start

8 Shuffled Complex Evolution Method

9 Pattern Search

تولید رواناب هورتون^۱ و هولت-هیبرت^۲ پیروی می‌کند که به ترتیب بیان می‌کند که رواناب زمانی پدید می‌آید که شدت بارش بیشتر از نفوذ باشد و هولت-هیبرت بیان می‌کند که وقتی خاک از آب اشباع شود رواناب ایجاد می‌شود (Mohammadi Vand, 2018). در ساختار مدل SMAR دو مولفه کلی در نظر گرفته شده است. مولفه اول، مربوط به بیلان آب بر مبنای گام زمانی تعریف شده است که در آن بیلان بین بارش، تبخیر و رواناب ایجاد شده و میزان ذخیره رطوبتی خاک در نظر گرفته می‌شود و مولفه روندیابی که نزول و اثرات بخشی حوضه را با استفاده از روندیابی اجزای مختلف، رواناب حاصل را در فواصل زمانی مختلف شبیه سازی می‌کند (Rostami Khalaj et al., 2016).

جهت ارزیابی کارایی و دقت مدل‌ها در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از ضریب نش-ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین (R^2) و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) استفاده شد (جدول ۲) و میزان کارایی و اعتمادپذیر بودن نتایج حاصل از این توابع از طریق جدول (۳) مشخص می‌شود.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی در مدل‌های SWAT و SMAR

Table 2- Evaluation criteria in SWAT & SMAR models (Houshmand Kouchi et al., 2017)

معیار Criteria	فرمول Formula
نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe efficiency)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_{i/s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - \bar{Q}_o)^2} \right]$
ضریب تعیین (Coefficient of determination)	$R^2 = \frac{\sum_i (Q_{i'o} - \bar{Q}_o)(Q_{i's} - \bar{Q}_s)^2}{\sum_i (Q_{i'o} - \bar{Q}_o)^2 \sum_i (Q_{i's} - \bar{Q}_s)^2}$
نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی Ratio of Standard deviation of observations to root mean (square error)	$RSR = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_{i/s})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i/o} - Q_m)^2} \right]$

در رابطه‌های مذکور $Q_{i/o}$ مقادیر مشاهداتی، $Q_{i/s}$ مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{Q}_o$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\bar{Q}_s$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد مشاهدات، Q_m انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی و Q_s انحراف استاندارد داده‌های شبیه‌سازی است.

جدول ۳- مقادیر و طبقات شاخص‌های NSE, R^2 , RSR

1 Horton

2 Hewlett & Hibbert

Table 3-Values and classes of NSE, R^2 & RSR indices
(Moriassi et al., 2007; Ayele, Teshale, Yu, Rutherford & Jeong, 2017)

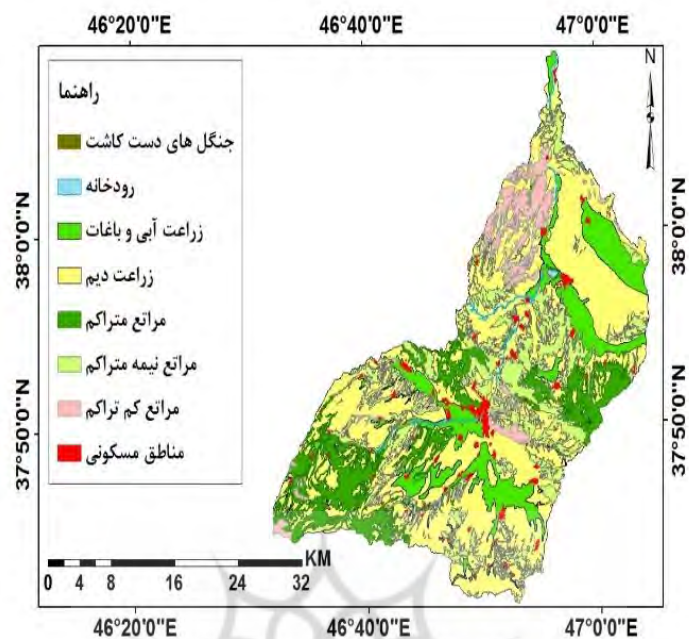
شاخص Index	مقادیر Values	طبقات Classes
NSE	1-0.75	خیلی خوب Very good
	0.75-0.65	خوب good
	0.65-0.5	رضایت بخش Satisfactory
	$NSE < 0.5$	ناکارآمد Inefficient
R^2	1-0.75	خیلی خوب Very good
	0.75-0.65	خوب good
	0.65-0.5	رضایت بخش Satisfactory
	$0.5 > R^2$	ناکارآمد Inefficient
RSR	0-0.5	خیلی خوب Very good
	0.5-0.6	خوب good
	0.6-0.7	رضایت بخش Satisfactory
	$RSR > 0.7$	ناکارآمد Inefficient

نتایج و بحث

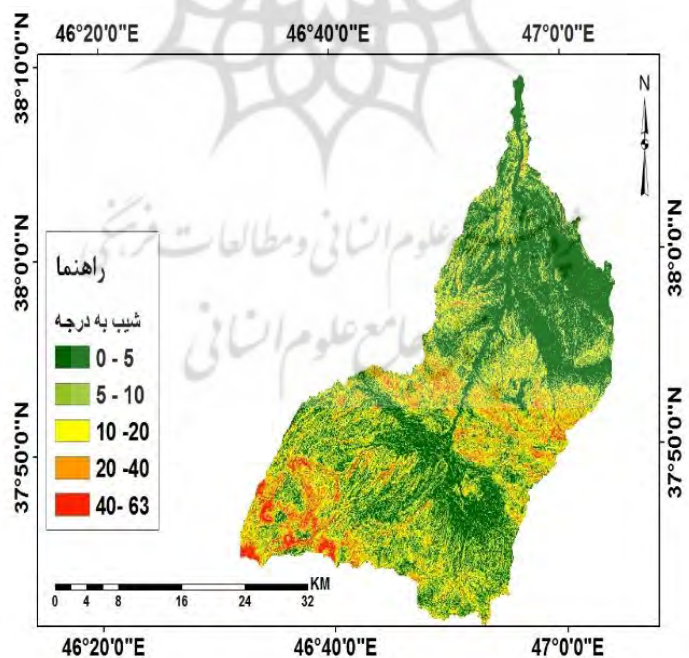
شبیه‌سازی رواناب در مدل SWAT

ابتدا با استفاده از تصویر DEM ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی، شیب و نقشه خاک، زیرحوضه‌ها و واحدهای واکنش هیدرولوژیک (HRU) در محیط Arc Map از طریق افزونه Arc-SWAT استخراج شد (اشکال ۲ تا ۴ و جدول ۴). در مجموع ۱۳ زیرحوضه و ۱۵۷ مورد واحد واکنش هیدرولوژیک ایجاد شد که هر کدام از این واحدها از نظر نوع کاربری، درصد شیب و هیدرولوژیک مشابه یکدیگرند و از طریق ۸ مورد ایستگاه بارانسنجی و ۵ مورد ایستگاه سینوپتیک، داده‌های بارندگی ۲۴ ساعته و مقادیر دمای حداقل و حداکثر و سایر پارامترهای اقلیمی وارد مدل گردید و ایستگاه سینوپتیک تبریز و یک ایستگاه از پایگاه داده CFSR¹ به عنوان ایستگاه‌های مرجع جهت تولید داده‌های میانگین و باسازی داده‌های مفقوده انتخاب گردید.

1 Climate Forecast System Reanalysis



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی اوجان چای
Fig.2. The landuse map of Ojan Chay

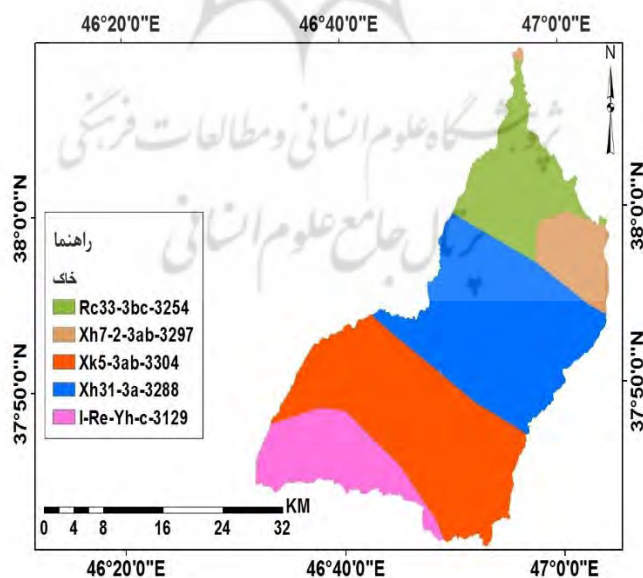


شکل ۳- نقشه شیب اوجان چای
Fig.3. The slope map of Ojan Chay

جدول ۴- مشخصات خاک اوجان‌چای (اقتباس از سایت FAO)

Table 4-The Soil features of Ojan Chay (FAO)

علامت اختصاری symbol	نام خاک Soil Name	بافت Texture	شیب Slope	توضیحات Explanations
Rc33-3bc-3254	Calcaric Regosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	ریگوسول‌هایی که حداقل بین ۲۰ تا ۵۰ سانتی متر از سطح، دارای آهک هستند. Rigosols that contain lime at least 20 to 50 cm from the surface.
Xh7-2-3ab-3297	Haplic Xerosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	دارای رژیم رطوبتی خشک Dry moisture regime
Xk5-3ab-3304	Calcic Xerosols	ریز Fine	هموار تا تپه‌ای Rolling to hilly	دارای یک افق آهکی در فاصله ۱۲۵ سانتی‌متری از سطح It has a calcareous horizon at a distance of 125 centimeters from the surface.
Xh31-3a-3288	Haplic Xerosols	ریز Fine	مسطح تا موج‌دار Level to undulating	دارای رژیم رطوبتی خشک Dry moisture regime
I-Re-Yh-c-3129	Lithosols , Eutric Regosols , Haplic Yermosols	درشت Coarse	به شدت بریده شده تا کوهستانی Steeply dissected to mountainous	خاک‌هایی که در فاصله ۱۰ سانتیمتری از سطح توسط سنگ‌های سخت و پیوسته محدود می‌شوند. Soils that are bounded by hard, continuous rocks within 10 centimeters of the surface.



شکل ۴- نقشه خاک اوجان‌چای (FAO)

Fig.4. The soil map of Ojan Chay

بعد از استخراج واحدهای واکنش هیدرولوژیک و دریافت خروجی مدل SWAT از طریق افزونه نرم افزار ARC MAP، نتایج به محیط نرم افزار SWAT-CUP انتقال داده شد. ۳ سال اول دوره آماری ۲۰۰۲-۲۰۲۱ برای دوره گرم کردن در نظر گرفته شد و جهت تعیین درجه حساسیت پارامترهای تاثیرگذار از طریق الگوریتم SUFI-2، حساسیت سنجی برای ۲۶ پارامتر در دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ از طریق داده های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بستان آباد صورت گرفت. حساسیت پارامترها به وسیله دو معیار p-value و t-stat مشخص شد. بطوریکه اگر مقدار p-value به صفر نزدیک تر باشد، پارامتر برای مدل مهم تر است و مقدار t-stat هرچه قدر بزرگتر باشد، حساسیت پارامتر بیشتر است. طبق نتایج حاصل، از ۲۶ پارامتر انتخابی، فقط ۱۲ پارامتر با حساسیت و تاثیرگذاری بیشتر به همراه محدوده مجاز تغییرات آنها در مدل وارد شدند. شماره منحنی نفوذ (CN2) به عنوان تابعی از کاربری اراضی، بافت خاک و شرایط رطوبتی برای تخمین تلفات آبی در نتیجه نفوذ استفاده می شود. مقادیر کم (CN) رواناب پایین و مقادیر بالای آن رواناب زیادی را تولید می کند. ظرفیت آب قابل دسترس (Sol- AWC) روی رواناب سطحی، جانبی و پایه تاثیرگذار است. تغییرات پارامتر ثابت تخلیه جریان (ALPHA_BF)، بر جریان پایه اثر می گذارد. ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی (GW-REVP) که کنترل کننده حرکت جریان آب از لایه آکیر کم عمق به لایه های خاک غیر اشباع است. زمان تاخیر انتقال آب (GW_DELAY) نشان دهنده اختلاف زمانی بین آب خروجی از پروفیل خاک و ورود آن به آکیر کم عمق است، پارامترهای TLAPS و PLAPS نیز نشان دهنده نرخ تغییرات دما و بارندگی به ازای افزایش ارتفاع در حوضه آبریز هستند. عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی (GWQMN) عمق آستانه جریان آب در آکیر کم عمق برای جریان بازگشتی است. هدایت هیدرولیکی (CH_K2) نقش تعیین کننده ای در حرکت و انتقال آب و املاح در خاک دارد. که بین ۰ تا ۵۰۰ است، تبخیر آب زیرزمینی، حداقل درجه حرارت ذوب برف و ضریب تاخیر رواناب سطحی از دیگر پارامترهای با حساسیت بالا هستند که به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و بهینه پارامترها در جدول (۵) ارائه شده است. واسنجی مدل با استفاده از مقادیر بهینه جدید پارامترها برای دوره آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۶ در گام زمانی ماهانه با تکرارهای متعدد شبیه سازی صورت گرفت تا بهترین مقادیر توابع هدف حاصل شد. پس از واسنجی پارامترها، مدل SWAT برای دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ در گام زمانی ماهانه اعتبارسنجی شد.

جدول ۵- پارامترهای حساس جهت استفاده در واسنجی مدل SWAT

Table 5- Sensitive parameters for using in calibration of SWAT model

مقدار بهینه	مقدار حداکثر	مقدار حداقل	نشانه اختصاری	نام پارامتر
Optimal	Max.	Min.	symbol	Parameter name
0.075	0.243	-0.053	r_CN2	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی Initial SCS curve number for moisture Condition
0.605	0.719	0.155	v_ALPHA_BF	ثابت تخلیه جریان از کانال Base flow alpha factor
-15.59	242.79	-172.29	v_GW_DELAY	زمان تاخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی The delay time for ground water
1.42	2.06	0.686	v_GWQMN	عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی Threshold depth of water in the Shallow
-0.375	0.002	-0.392	r_SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک Available water capacity of the soil layer
97.59	107.17	77.46	r_PLAPS	نرخ تغییرات بارش به ازای ارتفاع در زیرحوضه‌ها Precipitation lapse rate
0.849	0.857	0.424	r-SMTMP	حداقل دمای لازم برای ذوب برف Snow melt base temperature
55.46	76.06	48.13	r_CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر در آبرفت‌های کانال اصلی Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium
116.03	293.06	-124.56	r_REVAPMN	تبخیر آب زیرزمینی Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur
0.18	0.383	-0.005	r_GW_REVAP	ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی Groundwater REVAP coefficient
17.64	17.67	2.99	r_SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی Surface runoff lag time
27.40	28.58	-14.33	r_TLAPS	نرخ تغییرات دما به ازای ارتفاع در زیرحوضه‌ها Temperature lapse rate

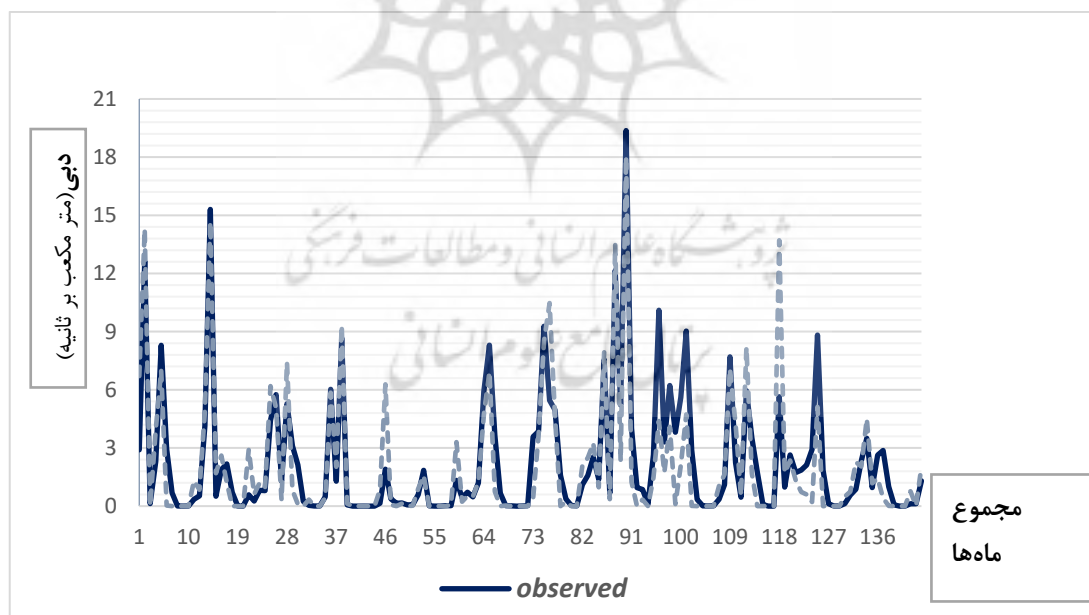
r: مقدار پارامتر ضرب در +۱ مقدار تعیین شده، v: مقدار تعیین شده جایگزین مقدار قبلی پارامتر

در واسنجی و اعتبارسنجی مدل، سه تابع هدف برای ارزیابی عملکرد مدل SWAT استفاده شد: ۱- ضریب نشت‌ساتکلیف (NSE) اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقدار آن بین ۱ تا منفی بی‌نهایت متغیر است، مقدار بهینه ۱ است و اگر میزان آن از مثبت ۰/۵ بیشتر باشد مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است طبق جدول ۳ (Moriasi et al., 2007; Ayele et al., 2017) اگر بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد نتیجه شبیه‌سازی خیلی خوب است. نتیجه این تابع هدف در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز اوجان‌چای خیلی خوب

است. ۲- ضریب تعیین R^2 ، بیان کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهداتی است که توسط مقادیر شبیه سازی شده توجیه می شود. ضریب تعیین بین صفر تا ۱ تغییر می کند و مقدار بهینه آن ۱ است (Kazemi Talkouyee, 2019). و مقادیر این ضریب نیز در شبیه سازی نتایج بالایی داشته است. ۳- ضریب RSR با استاندارد نمودن مقادیر باقیمانده میانگین مربعات خطا با استفاده از مقادیر مشاهداتی به دست می آید. برای این پارامتر مقادیر کمتر از ۰/۷ قابل قبول می باشد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبار سنجی در جدول (۶) و در شکل های (۵) و (۶) ارائه شده است.

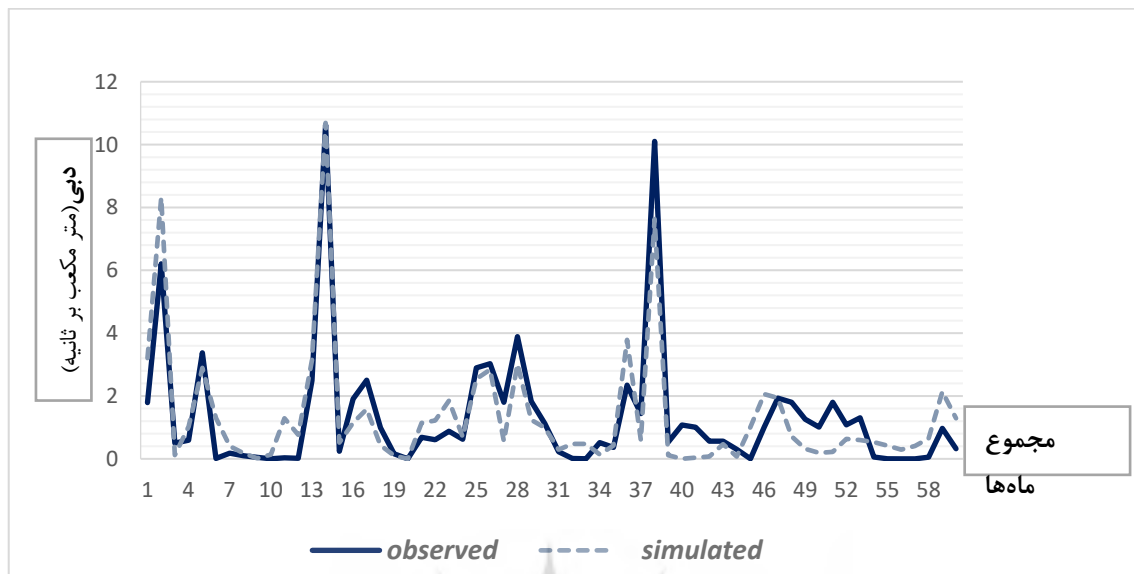
جدول ۶- مقادیر شاخص های ارزیابی شبیه سازی رواناب در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT

مرحله Period	دوره آماری Statistical period	P-factor	R-factor	R^2	NSE	RSR
واسنجی Calibration	2005-2016	0.75	0.96	0.81	0.80	0.45
اعتبار سنجی Validation	2017-2021	0.68	0.89	0.75	0.74	0.51



شکل ۵- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده اوجان چای در مرحله واسنجی (۲۰۰۵-۲۰۱۶)

Fig.5. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in calibration(2005-2016)



شکل ۶- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله اعتبارسنجی (۲۰۲۱-۲۰۱۷)
Fig.6. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in validation (2017-2021)

نتایج جدول (۶) نشان‌دهنده این است که بعد از حساسیت‌سنجی و اعمال پارامترهای بهینه‌شده در دوره واسنجی، ضرایب نش‌ساتکلیف (NSE)، R^2 و RSR به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۱ و ۰/۴۵ به دست آمد. نتایج مدل در مرحله واسنجی، در محدوده خیلی خوب قرار گرفت. برای دوره اعتبارسنجی نیز داده‌های دبی ماهانه در طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ وارد مدل گردید. ضرایب نش‌ساتکلیف (NSE)، R^2 و RSR در این مرحله به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۵۱ است که این نتایج دلالت بر توانایی مدل هیدرولوژیکی SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه‌آبریز اوجان‌چای دارد و کارایی مدل بر اساس مقادیر شاخص‌های ارائه شده در جدول (۳)، خیلی خوب ارزیابی می‌شود. اشکال (۵) و (۶) نمودارهای شبیه‌سازی شده رواناب حوضه‌آبریز اوجان‌چای را در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در مقیاس ماهانه را نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که دبی‌های حداکثر را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد که این امر خصوصاً در ماه‌های فوریه و مارس (زمستان) و فصل بهار است که این یکی از دلایل ضعف مدل در برآورد دبی‌های حداکثر است که دلیل آن استفاده از روش SCS است که بخوبی نمی‌تواند رواناب ناشی از ذوب برف را شبیه‌سازی کند که این شرایط در ماه‌های فروردین و اردیبهشت که خصوصاً زمان شروع بارش‌های محلی نیز است، در برخی از سال‌ها مشهود است.

شبیه‌سازی رواناب در مدل SMAR

با توجه به اینکه این نوع از مدل‌ها نسبت به مدل‌های نیمه‌توزیعی به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند. داده‌های بارندگی ماهانه، تبخیر و تعرق ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک (سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی) و داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری بستان‌آباد سازمان آب منطقه‌ای، مطابق فرمت نرم‌افزار، وارد

مدل گردید. جدول (۷) پارامترهای مورد استفاده جهت ارزیابی مدل از طریق الگوریتم ژنتیک را با مقادیر پیش فرض، دامنه تغییرات عددی و مقادیر بهینه آن‌ها را نشان می‌دهد، از این ۹ پارامتر، ۵ مورد مربوط به بیلان آب و بقیه مربوط به روندیابی جریان است: C: پارامتر بدون بعد که بیانگر تبخیر از سطح لایه‌های خاک است. Z: این پارامتر بیان‌کننده ظرفیت ذخیره رطوبتی موثر خاک بر حسب میلی‌متر است. H: نسبتی از بارش مازاد که در تولید رواناب مشارکت دارد (هنگامیکه خاک اشباع می‌شود). Y: بیان‌کننده ظرفیت نفوذ خاک است و جهت تخمین رواناب مازاد نفوذ (جریان هورتونی) به کار می‌رود. T: پارامتری بدون بعد که جهت محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از تشت تبخیر بکار می‌رود. G: پارامتری بدون بعد که جهت تخمین بخشی از رطوبت مازاد بر ظرفیت ذخیره رطوبتی خاک که آب زیرزمینی را تغذیه می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. Kg: بیانگر زمان تاخیر روندیابی آب زیرزمینی است. N: بیانگر ضریب روندیابی خطی هیدروگراف رواناب سطحی است. Nk: بیانگر مولفه روندیابی خطی هیدروگراف رواناب سطحی است. لذا با توجه به پارامترها و الگوریتم ژنتیک واسنجی مدل در دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۱۶ و اعتبارسنجی در دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۲۱ صورت گرفت و معیارهای R^2 و جهت ارزیابی عملکرد مدل در نظر گرفته شد. که نتایج ارزیابی در جدول (۸) و شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷- مقادیر پیش فرض بهینه شده مدل SMAR

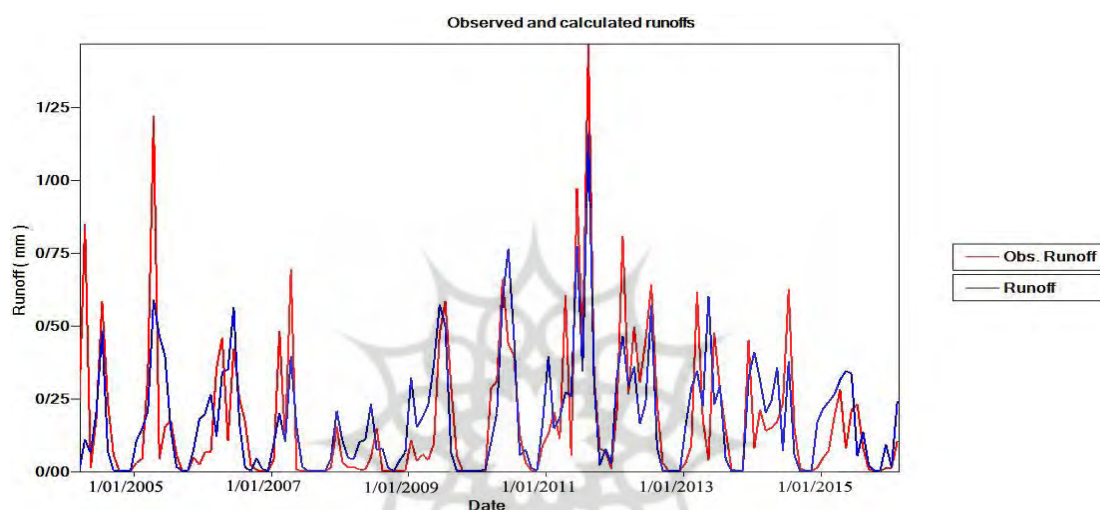
Table 7-Optimized default values of SMAR model

مقدار بهینه Optimal value	محدوده تغییرات Range of changes	مقدار پیش فرض Default value	پارامتر Parameter
0.816	0-1	0	تبخیر آب زیرزمینی (C) Groundwater evaporation rate
0.090	0-1	0	ضریب جریان آب زیرزمینی (G) Groundwater evaporation coefficient
0.012	0-1	0	نسبت رواناب مستقیم (H) Porportion direct runoff
0.855	0-1	0	ضریب فقدان ذخیره (Kg) Storage loss coefficient
1.1	1-6	1	U.H ضریب روندیابی خطی (N) U.H linear routing
1	0.01-1	1	مولفه روندیابی خطی (Nk) Component N.k
0.098	0-1	0	پارامتر تبدیل تبخیر (T) Evaporation conversion parameter
627	0.5000	0	نرخ نفوذ (Y) Infiltration rate
3706	0-5000	200	عمق ذخیره کلی رطوبت خاک (Z) Soil Moisture total storage depth

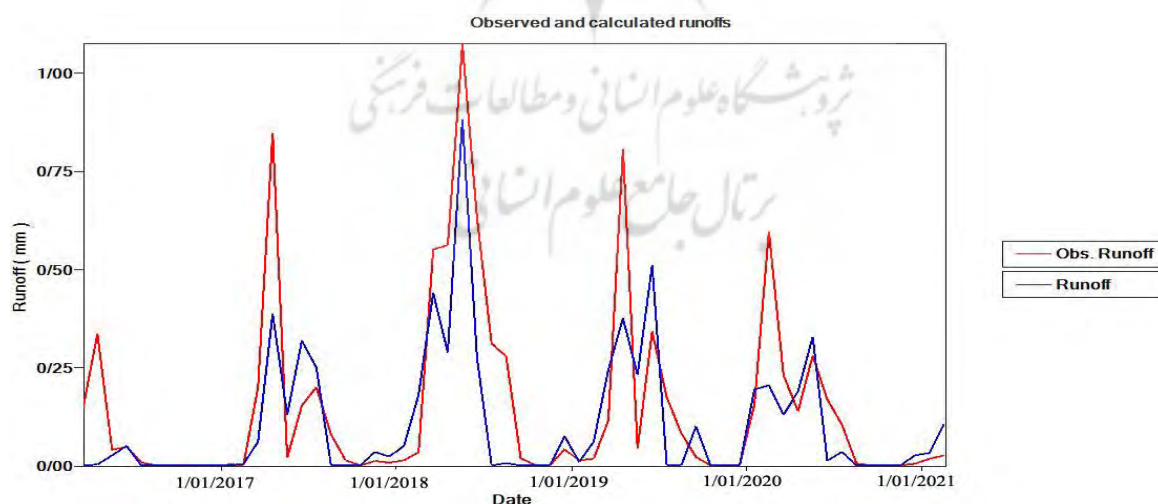
جدول ۸- مقادیر شاخص‌های ارزیابی شبیه سازی رواناب در مراحل واسنجی و اعتبار سنجی مدل SMAR

Table 8- Values of evaluation indices in runoff simulation in calibration & validaton of SMAR

مرحله Period	دوره آماری Statistical period	R^2	NSE
واسنجی Calibration	2005-2016	0.56	0.60
اعتبار سنجی Validation	2017-2021	0.67	0.625



شکل ۷- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله واسنجی SMAR
Fig.7. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in calibration of SMAR



شکل ۸- نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اوجان‌چای در مرحله اعتبارسنجی SMAR
Fig.8. Chart of observational & simulated discharge of Ojan Chay in validation of SMAR

با توجه به نتایج جدول‌های ۷ و ۸، پارامترهای تبخیر آب زیرزمینی، ضریب فقدان ذخیره، نرخ نفوذ و عمق ذخیره کلی رطوبت بیشترین تغییرات را در رابطه با مقدار پیش‌فرض دارند. ضرایب آماری نش‌ساتکلیف و R^2 (۰/۶۰ و ۰/۵۶) با استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک که برای ارزیابی بارش-رواناب در مرحله واسنجی بکار رفته، نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل SMAR با توجه به جدول ۳ (Moriassi et al., 2007, Ayele et al., 2017) است و مقادیر ضریب نش‌ساتکلیف و R^2 و در دوره اعتبارسنجی نیز برابر با ۰/۶۲۵ و ۰/۶۷ است. بررسی نمودارهای شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل SMAR نیز همانند مدل SWAT مقادیر دبی‌های پایه و متوسط را خوب شبیه‌سازی کرده است، اما در مورد دبی‌های حداکثر در مواردی شبیه‌سازی خوبی نداشته است که یا بیشتر از مقدار واقعی و یا کمتر از حد واقعی، رواناب را برآورد کرده است. اما در مجموع می‌توان گفت که اگر چه هر دو مدل ارزیابی خوبی در شبیه‌سازی رواناب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی دارند، با این حال عملکرد مدل SWAT با توجه به مقادیر بالای ضرایب آماری نش‌ساتکلیف و R^2 هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی، برتری آن را به مدل SMAR نشان می‌دهد که مطالعات رضازاده و همکاران (Rezazadeh, Ganjalikhani & Zounemet Kermani, 2015)، افخمی و نصیری صالح (Afkhani & Nasiri, 2015)، گلشن و همکاران (Golshan et al., 2016) و شاهویی و پرهمت (Shahoei & Porhemmar, 2019) تایید کننده برتری مدل‌های نیمه توزیعی به یکپارچه است که علت آن از یک سو نیمه‌توزیعی بودن مدل SWAT است که تمام تغییرات مکانی عوارض زمین را در نظر می‌گیرد و از سوی دیگر داشتن مولد تولید پارامترهای اقلیمی برای داده‌های مفقوده است. درحالی‌که مدل‌های یکپارچه بر این فرض استوار است که تغییرات دوره زمانی داده‌های اقلیمی و پارامترهای مدل در سطح حوضه یکنواخت هستند. درحالت کلی می‌توان گفت؛ مدل‌های یکپارچه و نیمه‌توزیعی می‌توانند بصورت مکمل هم بکار روند، روش‌های یکپارچه به داده‌های ورودی کمتری نسبت به مدل‌های نیمه‌توزیعی نیاز دارند که این امر در حوضه‌هایی که با کمبود آمار مواجه‌اند و از لحاظ مدیریتی هدف کاهش هزینه‌ها و سرعت ارزیابی است، مناسب می‌باشد. از طرف دیگر در مدل SWAT برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی که از نظر بافت خاک، کاربری اراضی و شیب همگن هستند، یک شماره منحنی جداگانه محاسبه می‌شود و رواناب در هر واحد واکنش هیدرولوژیکی به‌طور مستقل محاسبه و روندیابی می‌شود تا در نهایت مقدار رواناب کل حوضه محاسبه شود. این روش دقت محاسبات را افزایش می‌دهد و توصیف فیزیکی بهتری از بیلان آبی حوضه را ارائه می‌کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش از مدل فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT و مدل یکپارچه SMAR برای شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز اوجان‌چای در دوره ۲۰ ساله استفاده شد. در مدل SWAT حساسیت‌سنجی پارامترها با روش P-Value و T-Stat در محیط نرم افزار SWAT-CUP نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، ثابت تخلیه جریان از کانال، زمان تاخیر انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی، عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی، ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک، ضریب تاخیر رواناب سطحی، حداقل دمای لازم برای ذوب برف، نرخ تغییرات دما و بارش به ازای ارتفاع، ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی، هدایت هیدرولیکی و تبخیر آب زیرزمینی حساسیت بیشتری دارند. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های نش‌ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین R^2 و نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف‌معیار داده‌های مشاهداتی (RSR) در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی بیانگر کارایی خیلی خوب آن در شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز مورد مطالعه است و در مدل SMAR از ۹ پارامتر مورد استفاده در شبیه‌سازی رواناب، پارامترهای نرخ نفوذ، ضریب فقدان ذخیره، تبخیر آب زیرزمینی و عمق ذخیره کلی رطوبت خاک بیشترین تغییرات را نسبت به مقدار پیش‌فرض خود داشتند. عملکرد مدل در واسنجی و اعتبارسنجی با بکارگیری الگوریتم ژنتیک، با توجه به توابع نش‌ساتکلیف (NSE)، ضریب تعیین R^2 نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل SMAR است. هر دو مدل در رابطه با دبی‌های متوسط و پایه عملکرد خوبی ارائه داده‌اند. یکی از ضعف‌های هر دو مدل برآورد نامناسب دبی‌های پیک و وقایع شدید بوده است. فقدان داده‌های موردنیاز (بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت‌نسبی، سرعت باد و ...)، عدم ثبت درست داده‌ها توسط سازمان ذیربط، نیاز مدل SWAT به ورود حجم بالایی از داده و غیره همه از جمله دلایلی هستند که باعث کاهش دقت مدل‌ها و خطا می‌شود. نتایج مطالعات بیاتی‌خطیبی و کرمی (Bayati khatibi & Karami, 2019a) و بیاتی‌خطیبی (Bayati khatibi, 2020) نشان می‌دهد که ارتفاع و حجم رواناب در طی ۲۰ سال به دو برابر افزایش یافته است که تغییرات کاربری زمین از مرتع به زمین کشاورزی، نه تنها بر میزان رواناب‌ها، بلکه بر سرعت رواناب‌ها نیز افزوده است و وقوع بارش‌های روزانه شدید باعث شده در کمترین زمان، رواناب‌های عمیق با حجم بالا تشکیل گردد. که نتیجه آن گسترش فرسایش آبی، حرکات توده‌ای مواد در دامنه‌ها و سیلاب‌های ناگهانی است که در اردیبهشت و تیر ماه سال ۱۴۰۲ باعث خسارات اقتصادی به روستاهای حوضه آبریز اوجان‌چای از جمله شیرین‌بلاغ و قره‌اونه شده است. در مجموع از محدودیت‌های پژوهش می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- نیاز به حجم بالای از داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی که زمان‌بر و پرهزینه است. ۲- خطاهای بالای افزونه Arc SWAT که ممکن است به دلیل عدم لایسنس نرم‌افزارهای Arc GIS باشد. ۳- نسخه‌های جدید نرم‌افزار که عمدتاً پولی و تقریباً غیرقابل دسترس برای بیشتر کاربران است که باعث عدم استفاده از بخش‌های توسعه‌یافته مدل SWAT شود. در مجموع می‌توان گفت استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی (یکپارچه و نیمه‌توزیعی) می‌تواند به شناخت بهتر منابع آبی و ارتقاء کیفیت مدیریت آب و خاک خصوصاً در زمینه مخاطرات مرتبط با آن‌ها کمک شایانی کند.

References

- Afkhami, M., & Nasiri, F. (2015). Evaluation of the Application Distributed and Lumped Hydrologic Models in Simulation of Mean Daily Flow Discharge in Gharasoo River Basin in Ardebil. *Journal of Modares Engineering*, 15(5), 31-40. [In Persian] <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-3875-fa.html>
- Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyan, G. R. (2019). Comparison of the Performance of SWAT, IHECRAS And Artificial Neural Networks Models in Rainfall-Runoff Simulation (Case study: Kan Watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth*, 111, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002>
- Arekhi, S., Karkaz, S., & Emadodin, S. (2023). Flood Risk Zoning Due to Climate Change Using SWAT Hydrological Model in GIS Environment(Case Study: Gharasoo Watershed, Golestan Province). *Journal of Climate Change Research*, 4(14), 1-26. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/CCR.2023.394308.1127>
- Ayele, G. T., Teshale, E. Z., Yu, B., Rutherford, I. D., & Jeong, J. (2017). Streamflow And Sediment Yield Prediction For Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*, 9(10), 782. <https://doi.org/10.3390/W9100782>
- Bayati khatibi, M., & Karami, F. (2019a). The Estimation of Uplifting Share on Gully Erosion Rates Over Slopes, Case Study: Ojan Chay, North Estern Slopes of Sahand Mountain. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(2), 38-51. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_98646.html?
- Bayati khatibi, M., & Karami, F. (2019b). The Time and Runoff Velocity Estimation on Slopes of Ojan Chay Watershed. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(4), 1-14. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1398.7.4.1.5>
- Bayati khatibi, M. (2020). Investigating the Role of Land Use Changes in Hydrological Changes of Surfaces in Mountainous Area, Case Study: Ojan Chay. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 127-144. [In persain] <https://doi.org/10.22034/HYD.2020.41198.1540>
- Busico, G., Colombani, N., Frozi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A., & Mastrocicco, M. (2020). Evaluating SWAT Model Performance Actual and Future Runoff Susceptibility in a highly Urbanized Basin. *Journal of Environmental Management* 266, 110625. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110625>
- Dastjerdi, F., Azarakhshi, M., & Bashiri, M. (2019). Comparison of Efficiency for Hydrological Models (AWBM & SIHYD) and Neural Network (MLP & RBF) in Rainfall-Runoff Simulation (Case -Study:Bar Aryeh Watershed- Neyshabur). *Journal of Watershed Management Science*, 13(45), 107-118. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.45.13.7>
- Fazeli Thani, A., Motamad Vaziri, B., & Gaderi, K. (2016). A Review of Hydrological Modeling Softwares of Watershed, Introduction & Applications. Paper presented at the International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management & Environment in the Third Millennium, 1-23. [In Persian] <https://civilica.com/doc/585782>
- Ferreira, R. G., Dias, R. L. S., de Siqueira Castro, J., dos Santos, V. J., Calijuri, M. L., & da Silva, D. D. (2021). Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. *Ecological Informatics*, 66, 101453. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453>

- Golshan, M., Esmali Ouri, A., Shahedi, K., & Jahanshahi, A. (2016). Performance evaluation of SWAT and IHACRES models to simulate runoff in Khorramabad watershed. *Water and Soil Science*, 26(2-1), 29-42. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_5048_en.html?
- Guo, B., Zhang, J., Xu, T., Song, Y., Liu, M., & Dai, Z. (2022). Assessment of multiple precipitation interpolation methods and uncertainty analysis of hydrological models in Chaohe River basin, China. *Water SA*, 48(3), 324-334. <https://doi.org/10.17159/wsa/2022.v48.i3.324-334>
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S. H., Khalili, D., & Abbaspour, K. C. (2017). Sensitivity of calibrated parameters and water resource estimates on different objective functions and optimization algorithms. *Water*, 9(6), 384. <https://doi.org/10.3390/w9060384>
- Kaffas, K., Hrisanthou, V., Sevastas, S. (2018). Modeling Hydromorphological Processes in a Mountainous Basin Using a Composite Mathematical Model and Arc SWAT. *Catena*, 162, 108-129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.017>
- Karami, F., Bayatikhatabi, M., & Ganbari, A. (2016). *Estimation of Runoff and Sediment in Ahar Chay By Using The Soil and Water Assessment Model (SWAT)*. Research Project, Faculty of Geography & Planning, University of Tabriz.
- Karami, F., Bayatikhatabi, M., & Ganbari, A. (2017). *Investigating the Efficiency of Hydrological and Hydraulic Models in Determining Flood Zones in Ahar Chay*. Research Project, Faculty of Geography & Planning, University of Tabriz.
- Kazemi Talkouyee, A., Jourgholami, M., Abbaspour, K., & Feghhi, J. (2019). Simulation runoff and sediment yield in a harvested forest (Case study: Zailakirood Basin, northern Iran). *Iranian Journal of Forest*, 11(1), 29-41. [In Persian] https://www.ijf-isaforestry.ir/article_89235.html?
- Khavarian, H., Aghaie, M., & Mostafazadeh, R. (2020). Predicting the effects of land use changes on the monthly flow using hydrological model and Remote Sensing in the Kouzetopraghi watershed, Ardabil. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 19-39. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/HYD.2020.37489.1512>
- Lin, B., Chen, X., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., & Gao, L. (2015). Analyses of Landuse Change Impacts on Catchment Runoff Using Different Time Indicators Based on SWAT Model. *Ecological Indicators*, 58, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031>
- Lv, Z., Zuo, J., & Rodriguze, D. (2020). Predicting of Runoff Using an Optimized SWAT-ANN: A Case Study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100688, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100688>
- Mansouri, B., & Pirmoradian, R. (2019). Evaluation and Comparison of Lumped and Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 81-90. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.66081>
- Memgistu, K. T. (2009). *Watershed hydrological Responses to Changes in Land Use and Land Cover and management Practises at Hare Watershed, Ethiopia*. Research Institute for Water and Enviroment. <https://dspace.ub.uni-siegen.de/handle/ubsi/420>

- Mohammadi Vand, M. R. (2018). *Assessment and Comparison of Hydrological Models with Different Structures in a Single Basin*. Master's thesis, Water Resources Engineering, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran. [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. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005) *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005*. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Temple. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Parvaz, M., & Shahoei, S. V. (2022). Investigation Using AWBM Model for Monthly Runoff Simulation of Urmia Lake Basin in Kurdistan Province, Sonate station. *Journal of Environmental Science Studies*, 7(3), 5347-5359. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/JESS.2022.342020.1783>
- Ramezani, M. R., Helfer, F., & Yu, B. (2023). Individual and combined impacts of urbanization and climate change on catchment runoff in Southeast Queensland, Australia. *Science of The Total Environment*, 861, 160528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160528>
- Rashidi, B., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2017). Improving runoff prediction using WAPABA model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(1), 87-94. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/IJWR.2017.61343>
- Reddy, N. M., Saravanan, S., & Abijith, D. (2023). Streamflow simulation using conceptual and neural network models in the Hemavathi sub-watershed, India. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(2), 100153. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100153>
- Rezaei Moghadam, M. H., Hejazi, M. A., & Behbody, A. (2018). Estimation of Runoff Catchment in East Azerbaijan Province: Comparative Application of Calibration Methods and Uncertainty Analysis of SWAT Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 59-75. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/GEO.V8I3.81998>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & Shafieimehr, M. (2021). Calibration and validation the SWAT model in the simulation of runoff and sediment in Shahr Chai of Miyaneh. *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 129-139. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2020.40775.2656>
- Rezazadeh, M. S., Ganjalikhani, M., & Zounemat-Kermani, M. (2015). Comparing the performance of semi-distributed SWAT and lumped HEC-HMS hydrological models in simulating river discharge (Case study: Ab-Bakhsha Watershed). *Journal of Ecohydrology*, 2(4), 467-479. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/IJE.2015.58074>
- Rezvani, F. S., Ghorbani, K., Salarijazi, M., Rezaei Ghaleh, L., & Yazarloo, B. (2023). Comparative assessment of Sacramento, SMAR, and SimHyd models in long-term daily runoff simulation. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 279-297. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.11794.1171>
- Roostaei, S., Ayaseh, F., & Rezayi Moghadam, M. H. (2020). Quasi 2 Dimentional Simulation of Lighvan River Flood Flow With Emphasis On Floodplain Using MIKE 11 Technique.

- Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 28-41 [In Persian]
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2020.109532>
- Rostami Khalaj, M., Moghadamnia, A. R., Salmani, H., & Sepahvand, A. R. (2016). Compare the Performance of AWBM, SACRAMENTO, SIMHYD, SMAR And Tank. *Natural Ecosystems of Iran*, 7(2), 47-63. [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*, 9(23), 85-98. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/JNEH.2019.29033.1500>
- Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R., & Melesse, A. M. (2010). Modeling of Sediment Yield From Anjeni–Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, JAWAR. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 514-526.
<https://doi.org/10.1111/j.17521688.2010.00431.x>
- Shafiei, M., & Gharari, S. (2018). A Review on Hydrological Modelling Concepts: Part 1 - Introduction of Modelling Process. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(2), 95-102. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/JWSD.V4I2.62154>
- Shahoei, S. V., & Porhemmat, J. (2019). Comparison and Assessment of Two Lumped AWBM and Semi-Distributed SWAT Models in Monthly Runoff Simulation of Gharah-Sou River in Kermanashah Province, Iran. *Environment and Water Engineering*, 5(1), 71-82. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jewe.2019.143387.1275>
- Shikh Gooderzi, M., Jabbarian Amiri, B., & Azarnivend, H. (2018). Investigating Performance of the Conceptual Models in River Hydrologic Simulation. *Journal of Natural Environment*, 71(4), 509-521. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/JNE.2018.227408.1339>
- Song, M., Shi, Y., Yao, H., & Zhang, W. (2019). A Comparative Study of Different Hydrological Model and Their Application in Bass River Catchment. Paper presented at the Proceedings of the 7th Annual International Conference on Material Science and Engineering 562 , 1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/562/1/012116>
- Zarezade Mehrizi, S. O., Khoorani, A., Bazrafshan, J., & Bazrafshan, O. (2017). Assessing the efficiency of SWAT model for runoff simulation in Gamasiyab basin. *Journal of Range and Watershed Managment*, 70(4), 881-893. [In Persian]
<https://doi.org/10.22059/JRWM.2018.243898.1174>