



## Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment)

S. Nourinezhad<sup>1</sup>, M.M. Rajabi<sup>2\*</sup>, T. Fathi<sup>3</sup>

Received: 16-10-2021

Revised: 04-01-2022

Accepted: 10-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Nourinezhad S., Rajabi M.M., and Fathi T. 2022. Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment). Journal of Water and Soil 36(2): 167-183. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.72912.1100](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.72912.1100)

### Introduction

Simulation of quantity and quality of surface runoff in mountainous watersheds is one of the most challenging topics in modeling due to its unique features, such as unusual topography and complex hydrological processes. One of the lesser-known aspects of modeling such catchments is the uncertainty analysis of water quality predictions, especially about the vital phosphorus parameter. Phosphorus is one of the important quality variables in water, and its increase in water resources can cause eutrophication phenomena in streams and reservoirs of dams. Due to the importance of the phosphorus parameter and the fact that water quality modeling has not been employed in the Karaj catchment area so far, in this research, total phosphorus has been modeled as a water quality parameter along with the flow and sediment discharge. This study aims to identify the most sensitive parameters of the model to flow, sediment, and total phosphorus discharge and calibrate, validate and analyze the parametric uncertainty of the SWAT model in predicting these three variables in a mountainous catchment. The case study was the catchment area of the Karaj River upstream of Bileqan pond, which is one of the mountainous watersheds in Iran. There are two critical water structures along the Karaj River, namely Amirkabir dam and Bilqan pond. Amirkabir dam (Karaj) is a multi-purpose project that is constructed to supply drinking water to Tehran and regulate water for irrigation and agriculture in the suburbs of Karaj. The Bileqan pond is also the essential point of supply and transfer of drinking water in Tehran. Given the importance of this region in supplying water for different uses, providing a calibrated model for quantitative and qualitative variables of water can be the basis for decisions to apply future management scenarios in this basin.

### Materials and Methods

The case study was the Karaj River catchment area upstream of Bilqan Basin, which with an average height of 2880 meters, is one of the mountainous areas located in the Alborz Mountains. This basin with an area of 1076 square kilometers in the north, includes parts of Mazandaran province. In the east and south of the catchment area includes parts of Tehran province and most of it is located in Alborz province. The average annual temperature and rainfall in this basin are 12.1 °C and 480 mm, respectively, and the average of 117 glacial days during the year is observed in this area. The long-term daily data of synoptic stations adjacent to the study area from the beginning of 1998 to the end of 2018 (21 years in total) was introduced to the model. Also, daily data of relative humidity, rainfall, minimum and maximum temperature, solar radiation hours, and wind speed as meteorological parameters measured at stations in the study area were introduced to the model. It

1 and 2- M.Sc. Graduate of Environmental Engineering and Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, respectively.  
(\*- Corresponding Author Email: [mmrajabi@modares.ac.ir](mailto:mmrajabi@modares.ac.ir))

3- Deputy Manager of the Water and Soil Office, Department of Environment, Tehran, Iran

should be noted that there was a lot of missing data in meteorological information, especially for daily temperature data. In addition to the above information, daily flow data discharged from Amirkabir dam and technical specifications of the dam were introduced to the model. In addition, orchard management information, including irrigation periods and information related to phosphate fertilizers used in regional orchards, were presented to the model. The global sensitivity analysis method was used to determine the sensitive parameters of the model. Furthermore, the SUFI2 algorithm was used in SWAT\_CUP software to calibrate and analyze the parametric uncertainty of the SWAT model. This algorithm quantifies the output uncertainty by 95% prediction uncertainty boundaries.

## Results and Discussion

According to the results of sensitivity analysis, the parameters Baseflow alpha-factor (ALPHA\_BF), Manning's "n" value for overland flow (OV\_N), and Precipitation Laps rate (PLAPS) were the most sensitive parameters to flow, sediment, and total phosphorus, respectively. The best Nash-Sutcliffe (NS) coefficients for runoff, sediment, and total phosphorus simulation obtained in all stations and after full calibration and validation periods were equal to 0.76, 0.56, and 0.92, respectively. Simulation of the peak points of the diagram of all three quantities was also associated with increased uncertainty and decreased model prediction accuracy, but due to the placement of more than 70% of the measured runoff and sediment values and nearly 60% of the measured total phosphorus values in the prediction uncertainty boundaries generated by SUFI2 algorithm the final value of the parameters used in the calibration process can be appropriate for simulating future scenarios in similar mountain catchments. The main weakness of the model is simulating the peak points of flow and sediment discharge. In the case of flow and sediment discharge, the liability of modeling can be generalized due to the lack of accurate prediction of the snowmelt inflow to the river in spring, which begins to increase in February and reaches the peak point in May. A considerable number of missing data in meteorological stations can effectively reflect the lack of accurate model prediction at the peak points. In this region, missing daily temperature data compared to other meteorological parameters has been significant. The dependency of the SWAT model on many experimental and quasi-experimental models such as SCS-CN and MUSLE can be another factor affecting the weakness in predicting the peak points of the sediment discharge, as well.

## Conclusion

According to the uncertainty analysis results, most of observed flow, sediment and total phosphorus discharge values were within the uncertainty prediction boundaries generated by the SUFI2 algorithm. The NS coefficient for all three variables has met the satisfactory modeling threshold. Therefore, it seems that the sensitive parameters identified and used in the calibration process in this study and their final values can be appropriate for modeling future scenarios for this study area and similar mountain catchments. One of the limitations of the present study was a large number of missing data in meteorological stations, especially for the temperature variable. Thus, providing required measured meteorological data to the model may enhance the simulation, especially at peak points.

**Keywords:** Calibration, Prediction, SUFI2, Semi-distributed Model, Water Quality

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۱۸۳-۱۶۷

## تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر برای یک حوضه آبریز کوهستانی (مطالعه موردی حوضه رودخانه کرج)

شاهین نوری نژاد<sup>۱</sup> - محمد مهدی رجبی<sup>۲\*</sup> - تورج فتحی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

## چکیده

شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب‌های سطحی در مناطق کوهستانی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این گونه حوضه‌های آبریز مانند تأثیر قابل توجه برف بر رژیم جریان، تغییرات زیاد پارامترهای هواشناسی به واسطه تغییر ارتفاع، نرخ بالای فرسایش و کمبود اطلاعات ناشی از مشکلات دسترسی فیزیکی، یکی از موضوعات چالش برانگیز در حوزه مدل‌سازی حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود. یکی از مواردی که کمتر در خصوص مدل‌سازی این گونه حوضه‌ها به آن پرداخته شده، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مرتبط با کیفیت آب، به ویژه در ارتباط با پارامتر مهم فسفر است. هدف از انجام این تحقیق واسنجی، اعتبارسنجی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامتری مدل SWAT در پیش‌بینی دبی جریان، رسوب و فسفر کل در یک حوضه آبریز کوهستانی است. مطالعه موردی در حوضه آبریز رودخانه کرج در بالادست آبگیر بیلقان انجام شده و الگوریتم SUFI2 برای انجام تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی، ضریب زبری رواناب سطحی و آهنگ افزایش بارش به ترتیب حساس‌ترین پارامترهای مدل نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل بودند. بهترین ضرایب نش-سانکلیف (NS) مربوط به شبیه‌سازی رواناب، رسوب و فسفر کل در همه ایستگاه‌ها و در مجموع دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب برابر با ۰/۷۶، ۰/۵۶ و ۰/۹۲ بدست آمد. همچنین شبیه‌سازی نقاط اوج نمودار هر سه کمیت مذکور با افزایش عدم قطعیت و کاهش دقت پیش‌بینی مدل همراه بوده، اما با توجه به قرارگیری بالای ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و رسوب و نزدیک به ۶۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر کل در بازه عدم قطعیت پیش‌بینی تولید شده توسط الگوریتم SUFI2، محدوده پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل می‌تواند الگوی مناسبی برای شبیه‌سازی سناریوهای آبی در حوضه‌های آبریز کوهستانی مشابه باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، کیفیت آب، مدل نیمه‌توزیعی، واسنجی، SUFI2

## مقدمه

در دو دهه اخیر مدل‌های نیمه‌توزیعی هیدرولوژی و کیفیت آب به

طور وسیع برای تصمیم‌سازی جهت مدیریت حوضه‌های آبریز، و پیش‌بینی اثر وقایع طبیعی و فعالیت‌های انسانی بر کمیت و کیفیت آب به کار گرفته شده‌اند. یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در این زمینه، مدل SWAT است (Arnold et al., 1998). نتایج تحقیقات پیشین حاکی از عملکرد مطلوب مدل SWAT در شبیه‌سازی فرایندهای مختلف از جمله انتقال رواناب سطحی، رسوب و پارامترهای کیفی در مقیاس‌های مختلف بوده است (Abbaspour et al., 2007; Niraula et al., 2013; Lamba et al., 2016). در مدل SWAT تعداد زیادی پارامتر ورودی وجود دارد که بسیاری از آن‌ها یا اساساً به شکل مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، و یا اطلاعات مناسب برای

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست و استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* - نویسنده مسئول: (Email: mmrajabi@modares.ac.ir)

۳- معاون دفتر حفاظت و مدیریت زیست محیطی آب و خاک سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.72912.1100

آبریز کوهستانی است. میزان فسفر در آب رودخانه کرج به دلیل پوشش گیاهی نسبتاً فقیر و نرخ فرسایش بالای حوضه آبریز، به خصوص در فصل بهار قابل توجه است و این موضوع سبب شده تا آب سد امیرکبیر در پایین دست این حوضه آبریز، در معرض تغذیه گرائی قرار گیرد (Kheiri et al., Arnold et al., 1998).

(2018; از طرف دیگر، حوضه آبریز رودخانه کرج نقش بسیار مهمی در تأمین آب شرب پایتخت ایران (تهران) ایفا می کند و لذا مدیریت بار آلودگی فسفر در این حوضه از اهمیت فوق العاده برخوردار است. در این راستا، مطالعه حاضر به شبیه سازی دبی، رسوب و فسفر کل در حوضه آبریز رودخانه کرج با استفاده از مدل نیمه تویزیوی SWAT می پردازد. تاکنون مطالعات متعددی پیرامون ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه سازی های هیدرولوژیکی و مدل سازی رسوب در حوضه های آبریز کوهستانی انجام شده است. برای مثال فلین و ون لیو (Flynn and Van Liew, 2011) از SWAT برای شبیه سازی دبی جریان و رسوب در حوضه کوهستانی برف خیز لامار<sup>۱</sup> در آمریکا استفاده کردند. یافته های آن ها نشان می دهد که SWAT برای شبیه سازی هر دو متغیر در مناطق کوهستانی و تحت سلطه ذوب برف مناسب است. آندریاناک و همکاران (Andrianaki et al., 2019) ادعان داشتند که مدل SWAT در منطقه مورد مطالعه آن ها زمان بندی ذوب برف را به طور دقیق پیش بینی کرده اما نتوانسته اوج جریان را برای سال های خاص با دقت مناسب شبیه سازی کند. از محدود مطالعاتی که به شبیه سازی فسفر در مناطق کوهستانی پرداخته اند می توان به مطالعه لیو و همکاران (Liu et al., 2016) در حوضه آبریز رودخانه شبانگشی<sup>۲</sup> اشاره کرد که توانستند با استفاده از SWAT پیش بینی های خوبی از فسفر ارائه دهند اما در نتایج آن ها تحلیل عدم قطعیت فسفر منعکس نشده است. در این تحقیق برای اولین بار در یک حوضه آبریز کاملاً کوهستانی که بیشتر سطح آن را مرتع با پوشش گیاهی کم تا متوسط در بر گرفته و فعالیت زراعی در آن به نسبت مناطق پست بسیار محدود است، تحلیل حساسیت جهانی<sup>۳</sup> و تحلیل عدم قطعیت پارامتری مدل SWAT در شبیه سازی ماهانه فسفر کل انجام شده و تأثیرگذارترین پارامترهای مدل در شبیه سازی فسفر کل (به همراه دبی و رسوب) معرفی شده اند. لازم به ذکر است که مدل سازی دبی و رسوب پیش نیاز مدل سازی فسفر کل می باشند.

توصیف کامل تغییر آن ها در سطح حوضه آبریز عموماً وجود ندارد (Talebizadeh et al., 2010) و لذا آنچه که به عنوان ورودی مدل به کار گرفته می شود، تنها تخمینی از مقادیر این گونه پارامترهاست؛ بنابراین تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT به منظور ارزیابی کارایی نتایج آن در شبیه سازی ها امری اجتناب ناپذیر است.

شبیه سازی حوضه های آبریز کوهستانی با استفاده از مدل های نیمه تویزیوی مانند SWAT، به چند دلیل یکی از موضوعات چالش برانگیز در حوزه مدل سازی محسوب می شود (Viviroli et al., 2007; Noor et al., 2014; Wu et al., 2015; Hasan and Pradhanang, 2017). نخست اینکه تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی مانند بارش و دما، به دلیل تغییر زیاد ارتفاع در سطح حوضه های آبریز کوهستانی، اغلب بسیار بیشتر از دشت ها و مناطق کم ارتفاع است که این موضوع تأثیرات قابل توجه در پیچیده تر شدن فرایندهای هیدرولوژیکی دارد (Kalra Kulkarni et al., 2010; and Ahmad, 2011; Singh and Goyal, 2016). دوم اینکه ذوب برف در ارتفاعات منشأ مهم ایجاد رواناب های فصلی است و تأثیر زیادی در رژیم فصلی جریان آب دارد (Li and Williams, 2008; Grusson et al., 2015). این موضوع نیز شبیه سازی با استفاده از مدل های رایج هیدرولوژیکی را با محدودیت مواجه می سازد (Rahman et al., 2013). سوم اینکه مناطق کوهستانی نسبت به سایر نواحی با خطر فرسایش جدی تری مواجه هستند (Prasannakumar et al., 2012) و سرعت فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه های کوهستانی بسیار بالاست که زمینه ساز افزایش غلظت آلاینده هایی مانند فسفر می باشد (Navratil et al., 2011; Wu et al., 2013). کمبود اطلاعات ناشی از دشواری دسترسی فیزیکی نیز چهارمین عامل چالش برانگیز در مدل سازی حوضه های آبریز کوهستانی بشمار می رود.

به واسطه این دلایل، پژوهش های متعددی در سال های اخیر به طور خاص به بحث مدل سازی نیمه تویزیوی حوضه های آبریز کوهستانی پرداخته اند (Andrianaki et al., Wang et al., 2018; Jeong et al., 2020; Zhang et al., 2021) و به کمک این پژوهش ها، از یک سو دانش مدل سازی حوضه های آبریز کوهستانی پیشرفت نموده، و از سوی دیگر محدودیت های مدل های رایج مانند SWAT در شبیه سازی این گونه حوضه های آبریز نمایان شده است. یکی از خلاءهایی که در مطالعات قبلی وجود دارد، عدم توجه به بحث تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت پارامتر کیفی "فسفر" است. این پارامتر از آن جهت که اغلب عامل محدودکننده تغذیه گرائی در منابع آب شیرین بشمار می رود، دارای اهمیت ویژه در مباحث کیفیت آب است (Carpenter, 2008)، و در حوضه های آبریز کوهستانی با نرخ فرسایش بالا، به میزان زیاد وارد منابع آب سطحی می شود. حوضه آبریز رودخانه کرج یک نمونه از این دست حوضه های

1- Lamar

2- Xiangxi

3- Global Sensitivity Analysis

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

متحدہ آمریکا توسعه داده شده است (Arnold *et al.*, 1998). این مدل مفهومی به منظور پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریتی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های بزرگ و پیچیده با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی و مورفولوژیکی در درازمدت طراحی شده است. SWAT قابل اتصال به نرم‌افزارهای GIS بوده، لذا حجم وسیعی از داده‌ها به صورت لایه‌های اطلاعاتی مانند نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و نقشه ارتفاعات رقومی<sup>۷</sup> (DEM) با استفاده از نرم‌افزار واسط GIS توسط مدل بکار می‌رود. مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه، ابتدا آن را به چند زیرحوضه تقسیم می‌کند. هر زیرحوضه نیز به چند قسمت دیگر به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۸</sup> (HRU) تقسیم می‌شود که این واحدها قسمت‌های درون هر زیرحوضه هستند که دارای نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی هستند. بدین ترتیب از نظر مکانی، HRU کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT است. برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب، SWAT از معادلات و روش‌های متعددی استفاده می‌کند که به تفصیل در منابع متعدد به آن‌ها اشاره شده است (Bagnold, 1977; Williams, 1975; Neitsch, 2005; Neitsch *et al.*, 2011; Arnold *et al.*, 2012).

### راه‌اندازی و اجرای مدل

در شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM که قبلاً تهیه شده بود، به مدل معرفی شد. پس از ترسیم شبکه آبراهه‌های محدوده مطالعاتی بر اساس DEM معرفی شده، حوضه آبریز توسط مدل ترسیم شده و زیرحوضه‌های تشکیل‌دهنده آن نیز مشخص گردید. با در نظر گرفتن حداقل سطح زهکش ۷۰۰ هکتار برای ترسیم زیرحوضه‌ها، تعداد ۹۱ زیرحوضه ترسیم شد. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های رستری مربوط به خاک، کاربری اراضی و تعیین طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف گردید. برای این کار دو نقشه اول از قبل آماده شده بودند و طبقات شیب نیز در همین مرحله با استفاده از مدل SWAT و در محیط ArcGIS تهیه شدند. با توجه به تنوع بالای شیب در منطقه، پنج طبقه شیب ۱۰-، ۲۰-۱۰، ۳۵-۲۰، ۵۰-۳۵ و بالاتر از ۵۰ درصد در مدل تعریف گردید. همچنین با توجه به اهمیت تعریف بازه‌های ارتفاعی به منظور بهبود شبیه‌سازی در نواحی کوهستانی (Bhatta *et al.*, 2020; Rahman *et al.*, 2013) تعداد پنج بازه ارتفاعی در هر زیرحوضه تعیین شد. نهایتاً ۴۹۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در این مرحله ساخته شد.

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق یعنی حوضه آبریز رودخانه کرج تا محل آبرگیر بیلقان، با ارتفاعات ۱۳۶۴ تا ۴۳۶۹ متر و متوسط ارتفاع ۲۸۸۰ متر جزء مناطق کاملاً کوهستانی است که در سلسله جبال البرز واقع شده است. این حوضه با مساحت ۱۰۷۶ کیلومتر مربع در شمال خود بخش‌هایی از استان مازندران، در شرق و جنوب حوضه بخش‌هایی از استان تهران را در بر گرفته و بخش اعظم آن در استان البرز قرار دارد. حدود ۶۰ درصد از این منطقه دارای ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین دمای سالانه و بارندگی در این حوضه به ترتیب ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و ۴۸۰ میلی‌متر است و میانگین ۱۱۷ روز یخبندان در طول سال در این منطقه مشاهده می‌شود. در مسیر رودخانه کرج دو سازه آبی بسیار مهم یعنی سد امیرکبیر و آبرگیر بیلقان قرار دارد. سد امیرکبیر (کرج) یک طرح چندمنظوره می‌باشد که از مهم‌ترین اهداف آن تأمین آب شرب تهران و تنظیم آب برای مصارف آبیاری و کشاورزی اراضی حومه کرج می‌باشد. همچنین آبرگیر بیلقان مهم‌ترین نقطه تأمین و انتقال آب شرب تهران به حساب می‌آید. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه مشخص شده است. اراضی واقع در محدوده مورد مطالعه شامل کاربری‌های پیکره‌های آبی<sup>۱</sup>، اراضی باغی<sup>۲</sup> و مرتع است که از انواع مرتع سه دسته مرتع با پوشش گیاهی ضعیف<sup>۳</sup>، متوسط<sup>۴</sup> و خوب<sup>۵</sup> در این حوضه وجود دارد. بیشترین کاربری اراضی در محدوده مربوط به کاربری مرتع با پوشش گیاهی متوسط است که مساحتی در حدود ۹۳۷ کیلومتر مربع و معادل ۸۶ درصد سطح کل محدوده مطالعاتی را در بر می‌گیرد (شکل ۲). بر اساس نقشه تهیه شده از نقشه جهانی خاک فائو<sup>۶</sup>، منطقه مطالعاتی دارای سه نوع خاک می‌باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده است.

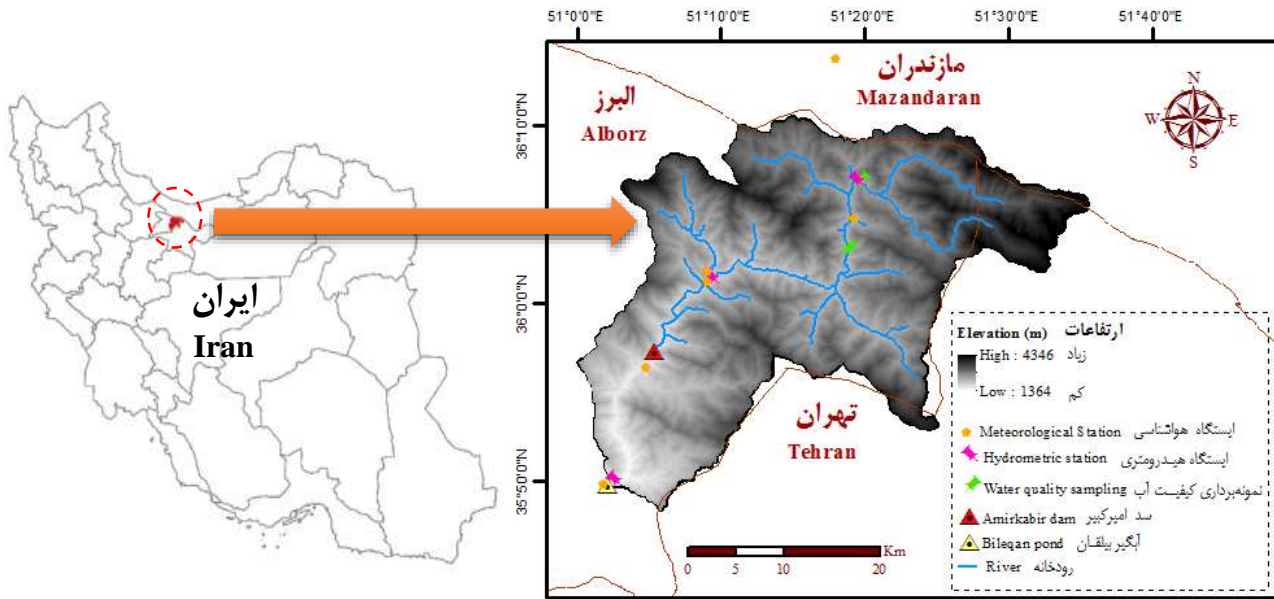
### مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی، پیوسته زمانی، نیمه‌توزیعی و با پایه فیزیکی است که توسط سازمان تحقیقات کشاورزی ایالات

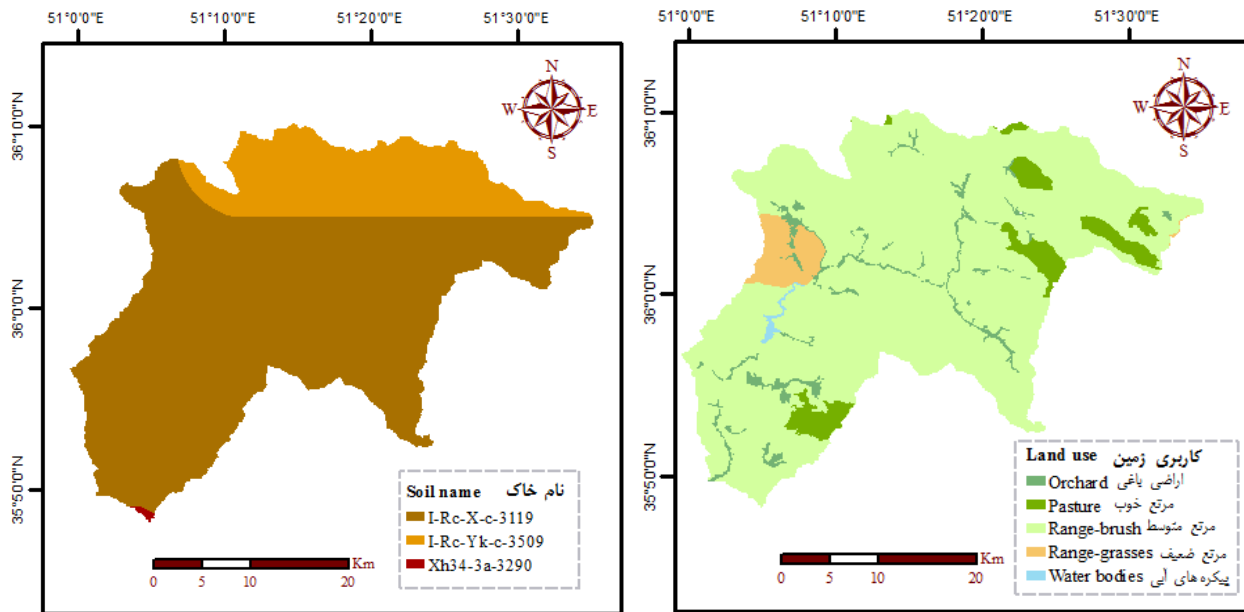
- 1- Water bodies (WATB)
- 2- Orchard (ORCD)
- 3- Range-grass (RNGE)
- 4- Range-brush (RNGB)
- 5- Pasture (PAST)
- 6- Food and Agriculture Organization of the United Nations

7- Digital Elevation Map

8- Hydrological Response Unit



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه  
Figure 1- Geographical location of the study area



شکل ۳- نقشه خاک  
Figure 3- Soil map

شکل ۲- نقشه کاربری اراضی  
Figure 2- Land use map

در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۹۸ تا انتهای سال ۲۰۱۸ (مجموعاً ۲۱ سال) به مدل معرفی شد. همچنین آمار روزانه پارامترهای رطوبت نسبی، بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی و سرعت باد

پس از تعریف واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی داده‌های هواشناسی به مدل معرفی گردید. در این مرحله پارامترهای هواشناسی مربوط به آمار داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک مجاور محدوده مطالعاتی

جریان بسته به مقیاس مسئله، مقدار فاکتور R کمتر از ۱/۵ و مقدار فاکتور P بزرگ‌تر از ۰/۷۰ یا ۰/۷۵ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب واسنجی می‌باشد (Abbaspour et al., 2015).

در نرم‌افزار SWAT\_CUP برای شناسایی حساس‌ترین پارامترهای مدل به‌منظور استفاده در فرایند واسنجی دو روش تحلیل حساسیت جهانی و تحلیل حساسیت مطلق<sup>۲</sup> تعیین شده است. در روش تحلیل حساسیت جهانی حساسیت پارامترها با استفاده از یک روش رگرسیون چندمتغیره محاسبه شده، سپس از آزمون T-Test برای تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر استفاده می‌شود. در این روش حساسیت متغیر نسبت به تغییرات یک پارامتر درحالی‌که باقی پارامترها نیز در حال تغییر هستند، سنجیده شده و میزان حساسیت آن‌ها با ضرایب حساسیت t-stat و p-value مشخص می‌گردد. هرچه قدرمطلق مقدار t-stat بزرگ‌تر و p-value کوچک‌تر باشد پارامتر مورد نظر حساس‌تر است. درحالی‌که در روش تحلیل حساسیت مطلق، حساسیت هر پارامتر نسبت به مقدار ثابت شده بقیه پارامترها سنجیده می‌شود (Abbaspour et al., 2007). تجربه ثابت کرده است که روش تحلیل حساسیت جهانی برای شناسایی حساس‌ترین پارامترها و تحلیل حساسیت مطلق برای بدست آوردن محدوده‌های مناسب پارامترها روند واسنجی مدل را تسهیل می‌کند (Faramarzi et al., 2017). در این تحقیق با توجه به مرور مطالعات قبلی درباره واسنجیدبی جریان، رسوب و فسفر کل در مدل SWAT (Abbaspour et al., 2007; Talebizadeh et al., 2010; Abbaspour et al., 2015; Engebretsen et al., 2019)، در مجموع ۴۰ پارامتر برای انجام تحلیل حساسیت جهانی در ابتدای فرایند واسنجی به‌منظور شناسایی حساس‌ترین پارامترها نسبت به سه متغیر مذکور و به‌کارگیری آن‌ها در واسنجی مدل تعیین شد. سپس برای تعیین بازه حساس هر پارامتر به‌منظور استفاده در فرایند واسنجی، روش تحلیل حساسیت مطلق مورد استفاده قرار گرفت. برای استفاده از این روش مراحل ذکر شده در مطالعه عباس‌پور و همکاران (Abbaspour et al., 2007) مبنای کار قرار گرفت.

در این مطالعه شاخص نش-ساتکلیف (NS) مبنای اصلی ارزیابی کیفیت واسنجی مدل بوده و علاوه بر آن از ضریب تعیین ( $R^2$ )، انحراف جذر میانگین مربعات (RMSE)، انحراف جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) نیز استفاده شده است. از انحراف در تحقیقات به‌عنوان نسبت انحراف میانگین مربعات خطا به انحراف استاندارد داده‌های اندازه‌گیری شده (RSR) یاد شده است (Moriasi et al., 2007).

به‌عنوان پارامترهای هواشناسی داخل منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مشابه به مدل معرفی گردید. لازم به ذکر است تعدد داده‌های مفقود در اطلاعات هواشناسی به‌ویژه داده‌های روزانه دما قابل توجه بوده است. علاوه بر اطلاعات فوق، داده‌های دبی روزانه تخلیه شده از سد امیرکبیر و مشخصات فنی سد به مدل معرفی گردید. همچنین با استناد به اطلاعات اداره جهاد کشاورزی استان البرز، اطلاعات مدیریتی اراضی باغی از جمله دوره‌های آبیاری و اطلاعات مربوط به کودهای فسفاته مصرفی در باغات منطقه نیز به مدل معرفی شد. پس از معرفی تمامی اطلاعات ورودی، جداول پایگاه داده مربوط به داده‌های ورودی مدل توسط مدل ساخته شد. در انتها، اجرای نهایی مدل SWAT صورت گرفت و نتایج شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه و از ابتدای سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ میلادی در پوشه خروجی پروژه ذخیره گردید. لازم به ذکر است که دو سال اول شبیه‌سازی به‌عنوان دوره آماده‌سازی<sup>۱</sup> تعیین گردید. هدف از درنظرگرفتن این دوره دستیابی به ثبات مدل و حذف اثر داده‌های اندازه‌گیری مفقود و یا خطادار می‌باشد.

#### واسنجی، تحلیل عدم قطعیت و اعتبارسنجی

از آنجایی که با استفاده از مدل SWAT، امکان تعریف و اعمال سناریوهای مختلف در زمینه مدیریت منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز و نیز انجام برنامه‌ریزی درازمدت برای حوضه ایجاد می‌شود، نتایج باید قابل اطمینان بوده و دارای حداقل عدم قطعیت باشد (Abbaspour et al., 2007). با توجه به متفاوت بودن بازه زمانی اطلاعات اندازه‌گیری شده متغیرهای دبی جریان، رسوب و فسفر کل در هر ایستگاه، حدود ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده برای دوره واسنجی و ۳۰ درصد آن برای دوره اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت که در **جدول ۱** بازه‌های زمانی تعیین شده در هر ایستگاه مشخص شده است. به‌منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل SWAT الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT\_CUP مورد استفاده قرار گرفت (Abbaspour et al., 2004). با استفاده از این الگوریتم عدم قطعیت خروجی توسط بازه‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد، کمی‌سازی می‌گردد. در این روش با استفاده از فاکتور R که معرف پهنای بازه عدم قطعیت بوده و همچنین فاکتور P که معرف نسبت مشارکت داده‌های اندازه‌گیری در بازه عدم قطعیت می‌باشد، کیفیت واسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که هرچه پهنای بازه عدم قطعیت به عدد صفر و مقدار فاکتور P به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، واسنجی از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار است. برای مثال در مورد پارامتر دبی

جدول ۱- بازه‌های زمانی تعیین شده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

Table 1- Periods set for model calibration and validation at stations in the study area

نام ایستگاه Station Name	متغیر اندازه‌گیری شده Measured Variable	دوره کالیبراسیون Calibration Period	دوره اعتبارسنجی Validation Period
گچسر Gachsar	دبی جریان و رسوب Flow and Sediment	2000 to 2011	2012 to 2017
سیرا-کرج Sira-Karaj	دبی جریان و رسوب Flow and Sediment	2000 to 2010	2011 to 2016
دیزین Dizin	فسفر کل Total Phosphorus	Feb-2014 to Jun-2016	Jul-2016 to May-2017
شهرستانک Shahrestanak	فسفر کل Total Phosphorus	Mar-2014 to Jun-2016	Jul-2016 to Dec-2018

حساسیت بیشتر برخی از پارامترها به بیش از یک متغیر، در مجموع ۲۶ پارامتر با بیشترین حساسیت معرفی شد. بر این اساس پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA\_BF)، ضریب زبری رواناب سطحی (OV\_N) و آهنگ افزایش بارش (PLAPS) به ترتیب به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل شناخته شدند. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده پارامترهای آهنگ افزایش دما و بارش (TLAPS و PLAPS) و همچنین پارامترهای برفی مانند دمای بارش و فاکتور ذوب برف (SFTMP، SMFMX) جزء پارامترهای با حساسیت زیاد بوده‌اند که در مطالعات مشابهی که در مناطق کوهستانی انجام شده نیز جزء پارامترهای حساس به حساب آمده‌اند (Rahman et al., 2013; Bhatta et al., 2020).

جدول ۲ طبقه‌بندی صحت نتایج مدل را بر اساس سه شاخص NS، R<sup>2</sup> و RSR نشان داده که در آن کیفیت مدل‌سازی با چهار دسته نامطلوب، رضایت‌بخش، خوب و خیلی خوب تقسیم‌بندی می‌شود (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015).

## نتایج و بحث

### تحلیل حساسیت مدل

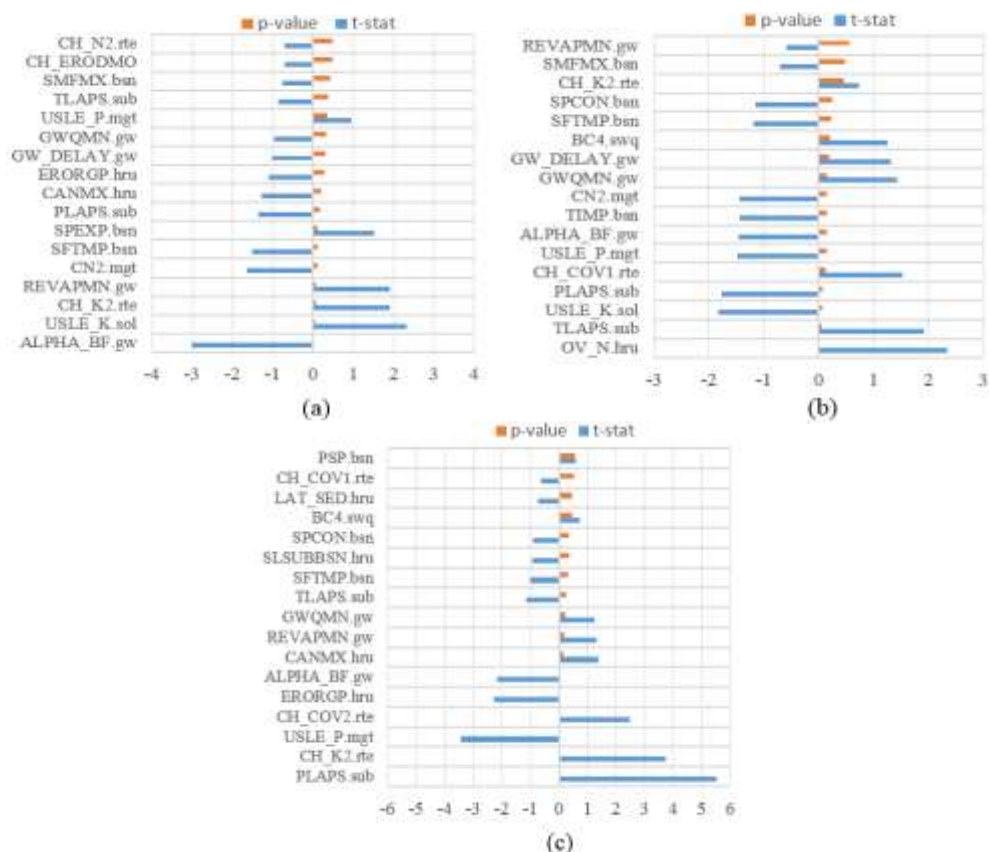
در ابتدا تحلیل حساسیت جهانی به‌منظور شناسایی پارامترهای حساس مدل با توجه به بازه مقادیر مجاز تعریف شده در مدل SWAT انجام شد. در شکل ۴، از میان ۴۰ پارامتری که برای رسوب و فسفر کل به‌صورت جداگانه ۱۷ پارامتری که قدرمطلق t-stat بزرگ‌تر و p-value کوچک‌تری نسبت به سایر پارامترها داشتند و به عبارتی حساس‌تر بودند، نشان داده شده است که با در نظر گرفتن

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت نتایج واسنجی بر اساس شاخص‌های آماری NS، R<sup>2</sup> و RSR (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015)

Table 2- Quality classification of calibration results based on NS, R<sup>2</sup> and RSR statistical indices (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015)

معیار خطا Measure	متغیر Variable	معیارهای ارزیابی عملکرد Performance Evaluation Criteria			
		خیلی خوب Very Good	خوب Good	رضایت‌بخش Satisfactory	نامطلوب Not Satisfactory
NS	دبی جریان Flow	NS > 0.80	0.70 < NS ≤ 0.80	0.50 < NS ≤ 0.70	NS ≤ 0.50
	رسوب Sediment	NS > 0.80	0.70 < NS ≤ 0.80	0.45 < NS ≤ 0.70	NS ≤ 0.45
	فسفر Phosphorus	NS > 0.65	0.50 < NS ≤ 0.65	0.35 < NS ≤ 0.50	NS ≤ 0.35
R <sup>2</sup>	دبی جریان Flow	R <sup>2</sup> > 0.85	0.75 < R <sup>2</sup> ≤ 0.85	0.60 < R <sup>2</sup> ≤ 0.75	R <sup>2</sup> ≤ 0.60
	فسفر/رسوب Sediment/Phosphorus	R <sup>2</sup> > 0.80	0.65 < R <sup>2</sup> ≤ 0.80	0.40 < R <sup>2</sup> ≤ 0.65	R <sup>2</sup> ≤ 0.40
RSR	دبی جریان/رسوب/فسفر Flow/Sediment/phosphorus	0.0 < RSR ≤ 0.5	0.5 < RSR ≤ 0.6	0.5 < RSR ≤ 0.7	RSR > 0.7





شکل ۴- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT برای متغیرهای دبی جریان (a)، رسوب (b) و فسفر کل (c)

Figure 4- Results of Sensitivity Analysis of SWAT Model Parameters for Flow (a), Sediment (b) and Total Phosphorus (c)

(CH\_ERODMO)، شاخص دسترس‌پذیری فسفر (PSP) و غلظت رسوب در جریان جانبی و آب زیرزمینی (LAT\_SED) با در نظر گرفتن حساسیت کمتر آن‌ها در مقایسه با ۲۲ پارامتر دیگر در واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفتند. مقادیر نهایی پارامترها در واسنجی پس از انجام ۱۷ تکرار در SWAT\_CUP بدست آمد. مطابق جدول ۴ مقادیر پارامترهای مربوط به برف و آهنگ افزایش دما و بارش (شماره ۱ تا ۵) پس از تکرار پنجم در فرایند واسنجی و دستیابی به مقادیر نسبتاً مناسب شاخص‌های آماری (جدول ۲) بر اساس مقادیر نمونه‌گیری شده از بهترین دور شبیه‌سازی مدل ثابت گردید. این عمل باعث کاهش قابل توجه ضخامت بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (فاکتور R) برای هر سه متغیر و نزدیک شدن به مقدار ۱/۵ و کمتر از آن شد که برای مدل‌سازی مطلوب توصیه شده است (Moriasi et al., 2015). سپس به منظور دستیابی به نتایج بهتر با تغییر بازه‌های تعریف شده برای سایر پارامترها در تکرارهای بعدی، در نهایت حدود نهایی آن‌ها در آخرین تکرار بدست آمد.

این در حالی است که در مناطق غیر کوهستانی و پست، این پارامترها به ندرت به عنوان پارامترهای حساس محسوب شده‌اند (Niraula et al., 2013; Mengistu et al., Azimi et al., 2013). در نتایج تحلیل حساسیت پارامترها برای متغیر فسفر کل نیز سه پارامتر TLAPS, PLAPS و SFTMP از حساسیت بالایی برخوردار هستند. این موضوع اهمیت بالای دو عامل تغییرات ارتفاع و برف که از ویژگی‌های بارز مناطق کوهستانی است و نقش مؤثر آن‌ها در رژیم کمی و کیفی رودخانه در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

#### مقادیر نهایی پارامترها در واسنجی مدل

از مجموع ۲۶ پارامتر ذکر شده در شکل ۴ که حداقل نسبت به یکی از متغیرها حساسیت قابل توجهی داشته‌اند، ۲۲ پارامتر (جدول ۳) برای واسنجی مدل به کار گرفته شده و چهار پارامتر ضریب مانینگ برای کانال اصلی (CH\_N2)، فاکتور فرسایش کانال

جدول ۳- مقادیر واسنجی شده پارامترها

Table 3- Calibrated parameter values

شماره No.	نام پارامتر Parameter	روش تغییر Method of Change	مقدار نهایی Final Value	شماره No.	نام پارامتر Parameter	روش تغییر Method of Change	مقدار نهایی Final Value
1	SFTMP.bsn	Replace	4.44	12	CN2.mgt	Relative	[0.20,0.35]
2	TIMP.bsn	Replace	0.94	13	SLSUBBSN.hru	Relative	[0.09,0.12]
3	SMFMX.bsn	Replace	0.60	14	USLE_K.sol	Relative	[-0.85,-0.79]
4	PLAPS.sub	Replace	187.5	15	OV_N.hru	Relative	[0.10,0.18]
5	TLAPS.sub	Replace	-6.01	16	ERORGP.hru	Replace	[3,5]
6	REVAPMN.gw	Replace	[4.91,7.04]	17	USLE_P.mgt	Relative	[-0.12,-0.01]
7	GW_DELAY.gw	Replace	[173,329]	18	CH_COV1.rte	Replace	[0.53,0.57]
8	GWQMN.gw	Replace	[0.26,0.31]	19	CH_COV2.rte	Replace	[0.84,0.94]
9	ALPHA_BF.gw	Replace	[0.11,0.32]	20	SPCON.bsn	Replace	[0.007,0.008]
10	CH_K2.rte	Replace	[197,270]	21	SPEXP.bsn	Replace	[1.33,1.39]
11	CANMX.hru	Replace	[10.0,13.6]	22	BC4.swq	Replace	[0.23,0.61]

## ارزیابی واسنجی دبی جریان

بر اساس شکل‌های ۵، ۶ و ۷، در سه ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه مقدار R-factor کمتر از ۱/۵ و مقدار P-factor بیشتر از ۰/۷ بدست آمده است که بیانگر کیفیت مطلوب واسنجی دبی جریان است (Abbaspour *et al.*, 2015). با توجه به جدول ۴ در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل و در اغلب موارد NS و  $R^2$  به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۵ و ۰/۶ بوده و با RMSE بین ۲/۲۴ تا ۸/۸۳ مترمکعب در ثانیه مقدار RSR کمتر از ۰/۷ به دست آمده که بر اساس طبقه‌بندی کیفی مدل‌سازی (جدول ۳) مدل عملکرد رضایت‌بخش و خوب داشته است (Moriasi *et al.*, 2015). در ایستگاه بیلقان و به‌ویژه در دوره واسنجی مقادیر این شاخص‌ها نشان از پیش‌بینی ضعیف‌تر دبی جریان به نسبت سایر ایستگاه‌های مشاهداتی دارد. با توجه به مقایسه مقدار فاکتور R در شکل‌های ۵، ۶ و ۷، خروجی‌های مدل در ایستگاه بیلقان دارای عدم قطعیت بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌های سنجش دبی هستند. بر اساس جدول ۵ که متوسط متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصول مختلف سال را نشان می‌دهد، به جز فصل تابستان، در باقی فصول مقدار دبی کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است. همچنین بیشترین تفاضل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به فصل بهار می‌باشد که با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ در نقاط اوج در ماه مه میلادی (اواسط بهار) این اختلاف قابل ملاحظه است؛ بنابراین عمده ضعف مدل در هر سه ایستگاه عدم پیش‌بینی درست نقاط اوج جریان بوده است. این مسئله را می‌توان به

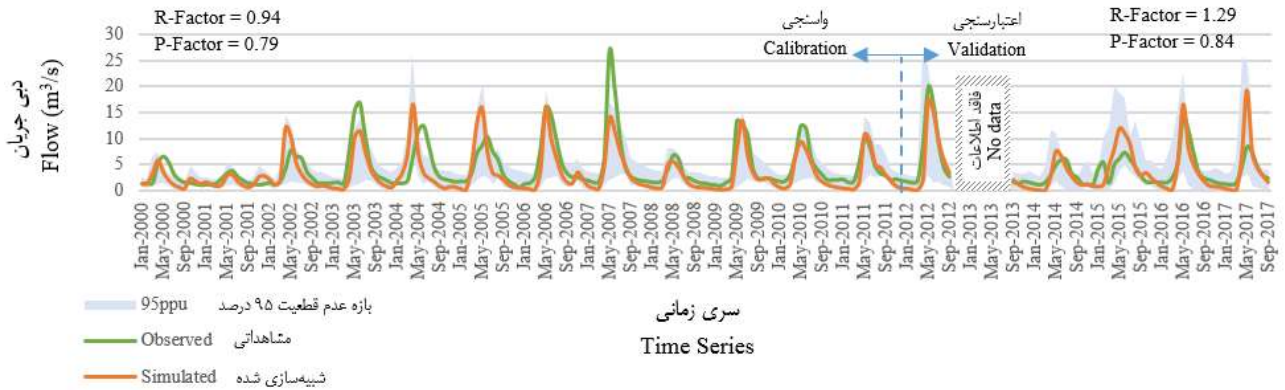
عدم پیش‌بینی صحیح جریان ورودی به رودخانه در اثر ذوب برف تعمیم داد که تقریباً از اواسط بهمن (فوریه میلادی) روند افزایشی آن شروع شده و اواسط اردیبهشت (مه میلادی) به اوج خود می‌رسد. چند عامل می‌تواند در عدم تشخیص صحیح این نقاط مؤثر باشد. اول اینکه تعدد قابل توجه داده مفقود در ایستگاه‌های هواشناسی می‌تواند بر عدم پیش‌بینی صحیح مدل مؤثر باشد (Rostamian *et al.*, 2008) که در این منطقه بخصوص کمبود داده‌های دمای روزانه در مقایسه با سایر پارامترهای هواشناسی قابل توجه بوده است. دوم اینکه مقادیر نهایی مربوط به پارامترهای دمای بارش و ذوب برف و آهنگ افزایش دما و بارش به کل زیرحوضه‌ها تعمیم داده شده و احتمالاً لازم است تا مقادیر آن‌ها با توجه به عدم قطعیت زیاد این پارامترها در نواحی کوهستانی (Kalra and Ahmad, Kulkarni *et al.*, 2010; Singh and Goyal, 2016) در سطح زیرحوضه‌ها تنظیم شود. اما بهترین پیش‌بینی‌های مدل با توجه به جدول ۵ در فصل پاییز بوده که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کمتر از مقدار متناظر برای سایر فصول بوده است. این نشان می‌دهد که پارامترهای کنترل‌کننده جریان پایه از جمله ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA\_BF)، زمان تأخیر آب زیرزمینی (GW\_DELAY)، عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق (GWQMN) و عمق آستانه آب برای حرکت از سفره آب کم‌عمق به آب‌های زیرزمینی (REVAPMN) که جزو پارامترهای حساس مدل هستند به‌خوبی تخمین زده شده‌اند.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی اعتبار مدل‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر کل  
 Table 4- Criteria for assessing the quality of flow, sediment and TP modeling

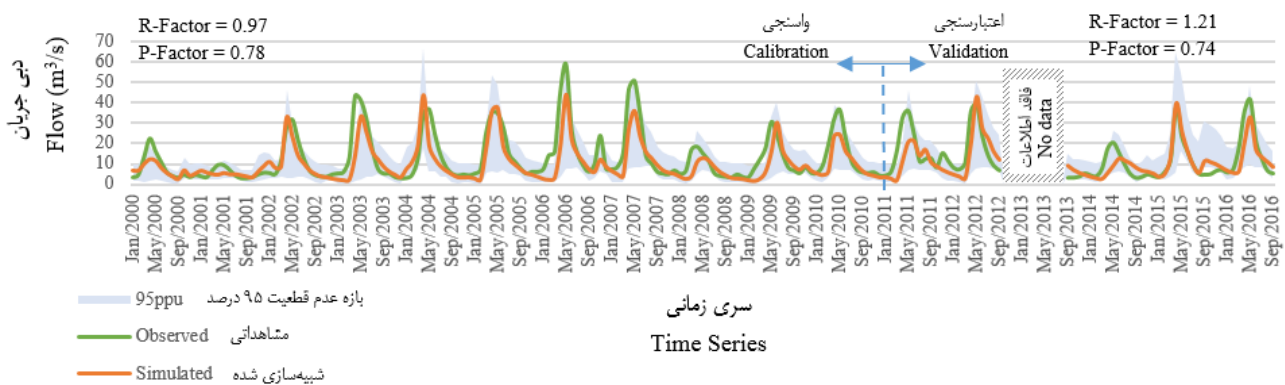
متغیر Variable	نام ایستگاه Station	واسنجی Calibration				اعتبارسنجی Validation			
		NS	R <sup>2</sup>	RMSE	RSR	NS	R <sup>2</sup>	RMSE	RSR
دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) Flow (m <sup>3</sup> /s)	گچسر Gachsar	0.63	0.71	2.45	0.57	0.76	0.83	2.24	0.56
	سیرا-کرج Sira-karaj	0.70	0.74	6.86	0.58	0.76	0.76	6.40	0.61
	بیلقان Bileqan	0.45	0.58	8.83	0.69	0.63	0.66	8.31	0.63
رسوب (تن در ماه) Sediment (ton/month)	گچسر Gachsar	0.47	0.56	1410	0.70	0.46	0.70	1701	0.64
	سیرا-کرج Sira-karaj	0.56	0.71	8940	0.56	0.54	0.56	9063	0.69
فسفر کل (تن در ماه) TP (ton/month)	دیزین Dizin	0.92	0.95	1.38	0.17	0.61	0.91	0.89	0.45
	شهرستانک Shahrestanak	0.91	0.95	3.74	0.24	0.7	0.89	3.46	0.35

جدول ۵- متوسط دبی جریان، رسوب و فسفر کل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصول مختلف  
 Table 5- Average flow, sediment and TP observed and simulated in different seasons

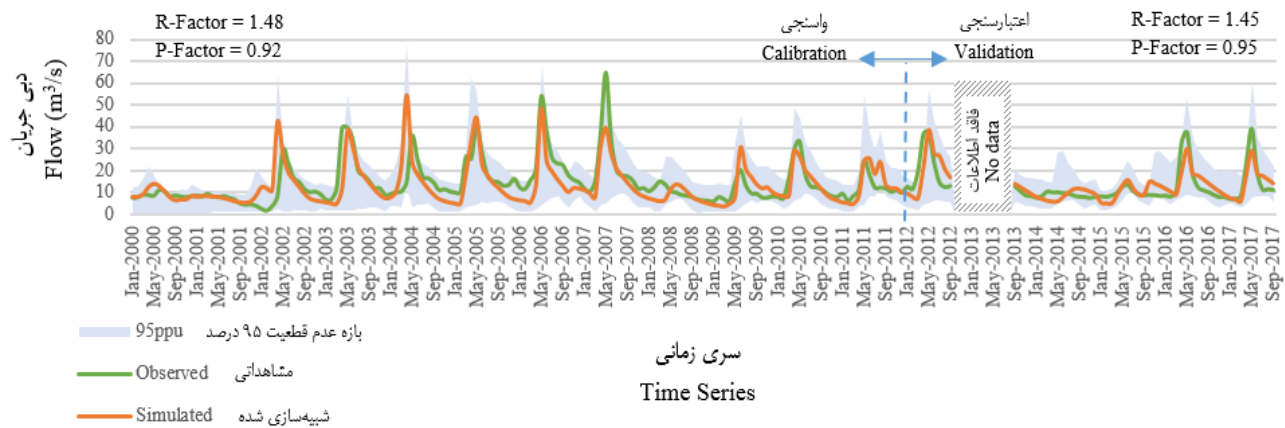
فصل Season	نوع کمیت Quantity Type	دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) Flow (m <sup>3</sup> /s)			رسوب (۱۰ <sup>۳</sup> تن در ماه) Sediment (10 <sup>3</sup> ton/month)		فسفر کل (تن در ماه) TP (ton/month)	
		گچسر Gachsar	سیرا-کرج Sira-karaj	بیلقان Bileqan	گچسر Gachsar	سیرا-کرج Sira-karaj	دیزین Dizin	شهرستانک Sharestanak
بهار Spring	مشاهداتی Observed	9.08	28.21	23.45	2.97	24.40	11.13	19.37
	شبیه‌سازی Simulated	8.36	20.73	21.39	3.35	15.54	12.76	13.37
	تفاضل Difference	0.72	7.48	2.06	-0.38	8.86	-1.63	6.00
تابستان Summer	مشاهداتی Observed	4.24	8.00	13.01	0.92	2.67	2.75	8.89
	شبیه‌سازی Simulated	3.22	9.59	13.90	0.78	3.85	1.50	7.36
	تفاضل Difference	1.02	-1.59	-0.89	0.14	-1.18	1.25	1.53
پاییز Fall	مشاهداتی Observed	1.61	5.78	9.79	0.21	1.76	1.40	2.20
	شبیه‌سازی Simulated	1.24	5.48	8.90	0.22	1.46	0.75	1.52
	تفاضل Difference	0.37	0.30	0.89	-0.01	0.30	0.65	0.68
زمستان Winter	مشاهداتی Observed	1.66	8.57	9.83	0.23	3.19	0.40	1.21
	شبیه‌سازی Simulated	1.00	5.17	7.58	0.22	1.51	0.58	2.37
	تفاضل Difference	0.66	3.40	2.25	0.01	1.68	-0.18	-1.16



شکل ۵- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه گچسر  
Figure 5- Runoff calibration and validation results at Gachsar station



شکل ۶- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه سیرا-کرج  
Figure 6- Runoff calibration and validation results at Sira-karaj station



شکل ۷- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه بیلقان  
Figure 7- Runoff calibration and validation results at Bileqan station

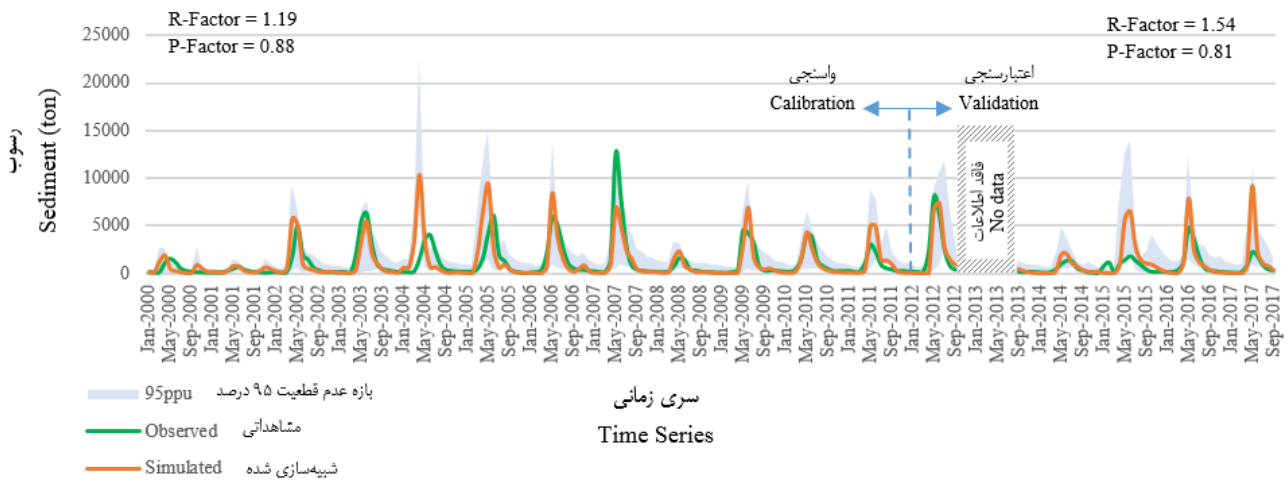
### ارزیابی واسنجی رسوب

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی رسوب در شکل‌های ۸ و ۹، در دوره واسنجی، میزان عدم قطعیت خروجی شبیه‌سازی رسوب در ایستگاه گچسر بیشتر از مقدار متناظر آن در ایستگاه سیرا-کرج است. با توجه به مقادیر فاکتور P، بازه عدم قطعیت بدست آمده در هر دو ایستگاه و

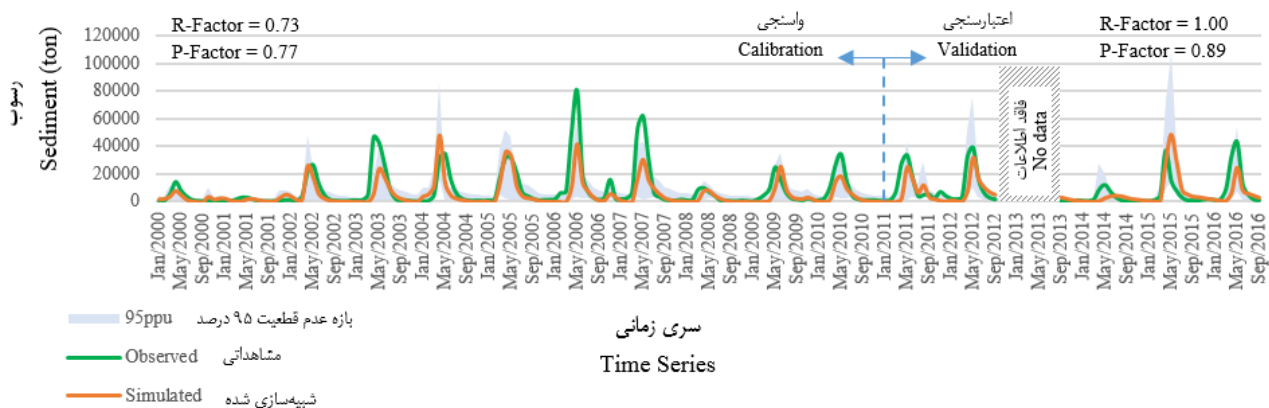
در مجموع دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی درصد قابل توجهی از مقادیر اندازه‌گیری شده (۷۷ تا ۸۹ درصد) را در بر می‌گیرد. بر اساس جدول ۴، در همه موارد NS و R<sup>2</sup> به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۴۵ و ۰/۴۰ و با RMSE بین ۱۴۱۰ تا ۹۰۶۳ تن، RSR کمتر از ۰/۷ بدست آمده است و بر اساس طبقه‌بندی کیفی مدل‌سازی (جدول ۲) مدل عملکرد

دقت پیش‌بینی جریان می‌تواند در تعیین میزان بار رسوب منتقل شده مؤثر باشد، بلکه وابستگی مدل SWAT به بسیاری از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی مانند SCS-CN و MUSLE را می‌توان عامل مؤثری دانست که باعث می‌شود تا SWAT بار رسوب را با دقت کمتری ردیابی کند (Nash and Sutcliffe, 1970). علاوه بر این، از آنجایی که مقادیر تخصیص داده شده به پارامترهای حساس مرتبط با روندیابی رسوب و فرسایش مانند پارامتر خطی محاسبه‌کننده حداکثر رسوب مجدداً وارد شده به کانال (SPCON)، فاکتور توان در روندیابی رسوب در آبراهه (SPEXP)، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در معادله USLE (USLE\_K)، فاکتور حفاظت خاک در معادله USLE (USLE\_P)، فاکتور فرسایش کانال (CH\_COV1) و همچنین سایر پارامترهای حساس از جمله ضریب زبری رواناب سطحی (OV\_N) به کل حوضه تعمیم داده شده است، به نظر می‌رسد با توجه به تنوع زیاد شیب و ارتفاعات در منطقه، ارزیابی و واسنجی این پارامترها در سطح زیرحوضه بتواند عملکرد مدل را بهبود ببخشد.

رضایت‌بخش و خوب داشته است. با توجه به جدول ۵، مدل در اکثر موارد به جز فصل بهار در ایستگاه گچسر و فصل تابستان در ایستگاه شهرستانک، مقدار رسوب را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. مانند دبی، بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصل بهار بوده که در شکل‌های ۸ و ۹ این تفاوت در نقاط اوج رسوب واضح‌تر به نمایش درآمده است. بهترین پیش‌بینی‌ها نیز مربوط به فصل پاییز است که داری کمترین مقدار رسوب در میان تمام فصول بوده و تفاضل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کمترین حالت قرار دارد. مقایسه شاخص‌های آماری به دست آمده به ویژه NS برای متغیرها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی رسوب نسبت به دبی جریان با دقت کمتری انجام شده که با مطالعات مشابه در زمینه واسنجی دبی جریان و رسوب همخوانی دارد (Flynn and Jalowska and Yuan, 2019 Van Liew, 2011). دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که با توجه به تأثیرپذیری رسوب از رژیم جریان (D'Ambrosio et al., 2017) نه‌تنها عوامل مؤثر در کاهش



شکل ۸- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رسوب در ایستگاه گچسر  
Figure 8- Sediment calibration and validation results at Gachsar station

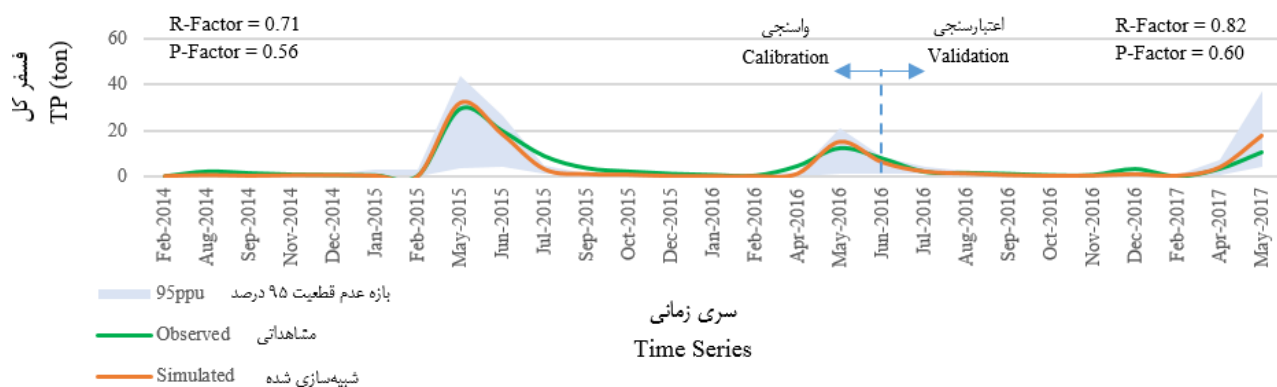


شکل ۹- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رسوب در ایستگاه سیرا - کرج  
Figure 9- Sediment calibration and validation results at Sira-karaj station

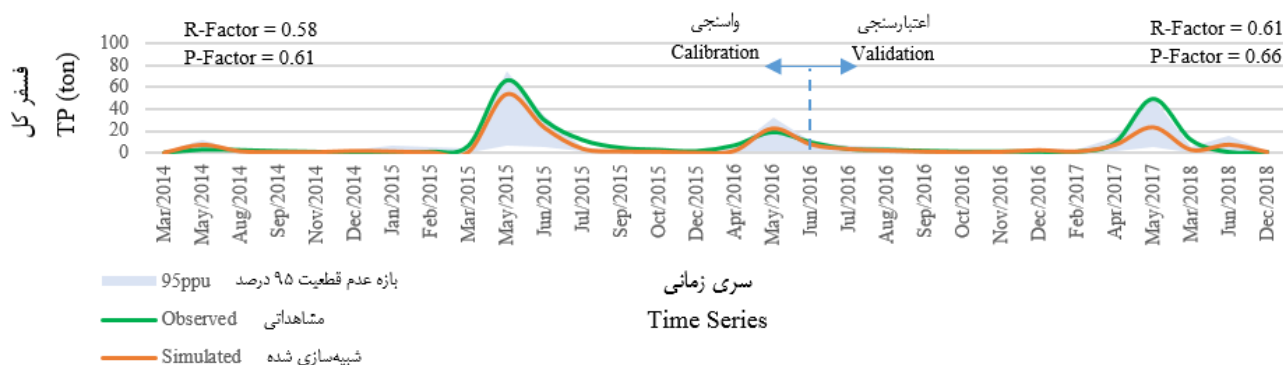
### ارزیابی واسنجی فسفر کل

فاکتور R در هر دو ایستگاه دیزین و شهرستانک کمتر از مقدار متناظر آن در پیش‌بینی دبی جریان و رسوب است که نشان‌دهنده عدم قطعیت کم پارامترهای استفاده شده در واسنجی فسفر کل است و به دلیل مقدار کمتر فاکتور R نسبت مشارکت مقادیر مشاهداتی فسفر کل در بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (فاکتور P) نیز عددی کوچک‌تر به دست آمده است. یکی از دلایل کمتر بودن فاکتور P در پیش‌بینی فسفر کل، پهنای بسیار کم بازه عدم قطعیت (فاکتور R) در ماه‌هایی است که مقادیر فسفر کل کمتر از ۲۰ تن می‌باشد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ که شاخص‌های NS و  $R^2$  بیش از ۰/۹ بوده و با RMSE بین ۱/۳۸ تا ۳/۷۴ تن در ماه، مقدار RSR در دو ایستگاه بین ۰/۱۷ تا ۰/۴۵ حاصل شده، مدل در پیش‌بینی فسفر کل عملکرد بسیار خوبی داشته و بهتر از دبی جریان و رسوب تخمین زده شده است. با توجه به جدول ۵ فسفر کل به طور متوسط در اغلب فصول کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده اما

در فصل زمستان بیشتر از آن برآورد گردیده است. کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه دیزین در فصل زمستان و برای ایستگاه شهرستانک در فصل پاییز رقم خورده است که ضخامت بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد در کمترین حالت خود قرار داشته و بیشترین اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز مربوط به فصل بهار بوده که در نقاط اوج (مه میلادی) این اختلاف به بیشترین حد خود می‌رسد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). فسفر کل در این منطقه با توجه به حاصل شدن NS بالای ۰/۹ بسیار نزدیک و یا بهتر از برخی مطالعاتی بوده که در حوضه‌های کوهستانی یا غیر کوهستانی مدل‌سازی کرده‌اند (Liu et al., 2016; Niraula et al., 2013; Zeiger and Hubbart, 2016). این نشان می‌دهد که SWAT در شبیه‌سازی فسفر کل در مناطق کوهستانی مشابه هم از نظر زمان‌بندی تغییرات بار فسفر کل و هم از نظر مقدار تغییرات آن می‌تواند عملکرد بسیار خوبی داشته باشد.



شکل ۱۰- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی فسفر کل در ایستگاه دیزین  
Figure 10- Total phosphorus calibration and validation results at Dizin station



شکل ۱۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی فسفر کل در ایستگاه شهرستانک  
Figure 11- Total phosphorus calibration and validation results at Shahrestanak station

## نتیجه‌گیری

عدم قطعیت به نسبت فصول دیگر سال هستند. مشکل پیش‌بینی نقاط اوج دبی جریان و رسوب در مطالعات مشابه مربوط به شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز کوهستانی در ایران و خارج از ایران نیز تجربه شده است (Flynn and Van Rostamian *et al.*, 2008; Liew, 2011; Jalowska and Yuan, 2019) که می‌توان آن را به عوامل مختلفی از جمله کمبود داده‌های دمای روزانه، وابستگی SWAT به مدل‌های تجربی روندیابی رسوب و فرسایش، و عدم بررسی تغییرات برخی پارامترهای دارای عدم قطعیت به تفکیک زیرحوضه‌ها در واسنجی مدل مرتبط دانست.

با توجه به اینکه اکثر شاخص‌های ارزیابی کیفیت، حاکی از عملکرد مطلوب شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر کل در این حوضه بوده‌اند، مدل واسنجی شده در این تحقیق می‌تواند مبنای پیش‌بینی‌های آتی در خصوص کمیت‌های مورد اشاره قرار گیرد و بر اساس آن می‌توان سناریوهای مدیریتی برای کنترل کیفیت آب تعریف کرد. از جمله محدودیت‌ها در تحقیق حاضر می‌توان به وجود تعداد زیاد داده‌های مفقود در ایستگاه‌های هواشناسی و بخصوص برای متغیر دما اشاره کرد که به نظر می‌رسد با توجه به تغییرات زیاد دما و بارش در ارتفاعات به دلیل ماهیت کوهستانی منطقه، هرچه اطلاعات کامل‌تری از اندازه‌گیری‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی به مدل ارائه شود، مدل پیش‌بینی بهتری از روند تغییرات کمیت‌ها به‌خصوص در نقاط اوج ارائه می‌کند.

## سپاسگزاری

نویسندگان این تحقیق از سازمان حفاظت محیط‌زیست، اداره کل محیط‌زیست البرز و شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌خاطر ارائه اطلاعات کمی و کیفی رودخانه کرج تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA\_BF)، ضریب زبری رواناب سطحی (OV\_N) و آهنگ افزایش بارش (PLAPS) به ترتیب حساس‌ترین پارامترها نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل بودند. همچنین در تحلیل حساسیت مدل برای متغیر فسفر کل، سه پارامتر TLAPS، PLAPS و SFTMP از حساسیت بالایی برخوردار بودند. این موضوع اهمیت بالای دو عامل تغییرات ارتفاع و برف و نقش مؤثر آن‌ها در رژیم کمی و کیفی رودخانه در حوضه کوهستانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به ضرایب  $R^2$ ، NS، RMSE و RSR بدست آمده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی هر سه متغیر رواناب، رسوب و فسفر کل، مدل در شبیه‌سازی رواناب و فسفر کل عملکرد بهتری داشته است. به‌ویژه در مورد فسفر کل و در دوره واسنجی مدل ضرایب NS و  $R^2$  دارای مقادیر بالای ۰/۹ و RSR کمتر از ۰/۵ بوده که نشان‌دهنده پیش‌بینی بسیار خوب مدل است. با توجه به مشارکت بالای ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و رسوب و حدود ۶۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر کل، بازه عدم قطعیت منطقی و مناسبی برای خروجی‌های مدل به دست آمده که ناشی از انتخاب محدوده مقادیر مناسب برای پارامترها در فرایند واسنجی است. در هر سه متغیر بیشترین عدم قطعیت مربوط به فصل بهار به‌ویژه در نقاط اوج جریان (مه میلادی) بوده که شامل بیشترین مقادیر مشاهداتی در هر سه متغیر بوده و دقت پیش‌بینی مدل نیز کمتر می‌باشد. بهترین پیش‌بینی‌های مدل نیز عمدتاً در فصولی است که دبی متوسط جریان به دبی پایه نزدیک بوده و کمترین بار ماهانه رسوب و فسفر در رودخانه منتقل می‌شود. با در نظر گرفتن تفاضل مقادیر متوسط مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (جدول ۵) برای دبی جریان و رسوب در فصل پاییز و برای فسفر کل در فصل زمستان بهترین پیش‌بینی‌ها انجام شده که دارای کمترین

## منابع

- 1- Abbaspour K.C., Johnson C.A., and Genuchten M.T van. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure 1352: 1340–1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>.
- 2- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S.R.I.N.I.V.A.S.A.N.B., Srinivasan R., Yang H., and Kløve 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- 3- Abbaspour K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J., and Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2-4): 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>.
- 4- Andrianaki M., Shrestha J., Kobierska F., Nikolaidis N.P., and Bernasconi S.M. 2019. Assessment of SWAT spatial and temporal transferability for a high-altitude glacierized catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(8): 3219-3232. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3219-2019>.
- 5- Arnold JG., Kiniry JR., Srinivasan R., Williams JR., Haney EB., and Neitsch SL. 2012. *Soil & Water Assessment*

Tool.

- 6- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- 7- Azimi M., Heshmati G.A., Farahpour M., Faramarzi M., and Abbaspour K.C. 2013. Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran. *Ecological Modelling* 250: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.017>.
- 8- Bagnold R.A. 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research* 13(2): 303-312. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00303>.
- 9- Bhatta B., Shrestha S., Shrestha P.K., and Talchabhadel R. 2020. Modelling the impact of past and future climate scenarios on streamflow in a highly mountainous watershed: A case study in the West Seti River Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V 740: 140156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140156>.
- 10- Carpenter S.R. 2008. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(32): 11039-11040. <https://doi.org/10.1073/pnas.080611210>.
- 11- D'Ambrosio E., De Girolamo A.M., Barca E., Ielpo P., and Rulli M.C. 2017. Characterising the hydrological regime of an ungauged temporary river system: a case study. *Environmental Science and Pollution Research* 24(16): 13950-13966. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7169-0>.
- 12- Engebretsen A., Vogt R.D., and Bechmann M. 2019. SWAT model uncertainties and cumulative probability for decreased phosphorus loading by agricultural Best Management Practices. *Catena* 175: 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.004>.
- 13- Faramarzi M., Abbaspour K.C., Adamowicz W.L.V., Lu W., Fennell J., Zehnder A.J.B., and Goss G.G. 2017. Uncertainty based assessment of dynamic freshwater scarcity in semi-arid watersheds of Alberta, Canada. *Journal of Hydrology Regional Studies* 9: 48-68. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.11.003>.
- 14- Flynn K.F., and Van Liew M.W. 2011. Evaluation of SWAT for sediment prediction in a mountainous snowmelt-dominated catchment. *Transactions of the ASABE* 54(1): 113-122. <https://doi.org/10.13031/2013.36265>.
- 15- Grusson Y., Sun X., Gascoin S., Sauvage S., Raghavan S., Anctil F., and Sánchez-Pérez J.M. 2015. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. *Journal of Hydrology* 531: 574-588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.070>.
- 16- Hasan M.A., and Pradhanang S.M. 2017. Estimation of flow regime for a spatially varied Himalayan watershed using improved multi-site calibration of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg 76(23). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7134-3>.
- 17- Jalowska A.M., and Yuan Y. 2019. Evaluation of SWAT impoundment modeling methods in water and sediment simulations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 55(1): 209-227. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12715>.
- 18- Jeong J., Yang J., Han S., Seo Y.S., and Hong Y. 2020. Assessment of coupled hydrologic and biogeochemical Hg cycles in a temperate forestry watershed using SWAT-Hg. *Environmental Modelling & Software* 126: 104644. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104644>.
- 19- Kalra A., and Ahmad S. 2011. Evaluating changes and estimating seasonal precipitation for the Colorado River Basin using a stochastic nonparametric disaggregation technique. *Water Resources Research* 47(5): 1-26. <https://doi.org/10.1029/2010WR009118>.
- 20- Kheiri S., Solak C.N., Edlund M.B., Spaulding S., Nejadattari T., Asri Y., and Hamdi S.M.M. 2018. Biodiversity of diatoms in the Karaj River in the Central Alborz, Iran. *Diatom Research* 33(3): 355-380. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2018.1557747>.
- 21- Kulkarni A.V., Rathore B.P., Singh S.K., and Ajai. 2010. Distribution of seasonal snow cover in central and western Himalaya. *Annals of Glaciology* 51(54): 123-128. <https://doi.org/10.3189/172756410791386445>.
- 22- Lamba J., Thompson A.M., Karthikeyan K.G., Panuska J.C., and Good L.W. 2016. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model. *International Journal of Sediment Research* 31(4): 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.004>.
- 23- Li X., and Williams M.W. 2008. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China. *Hydrological Processes* 22(19): 3931-3940. <https://doi.org/10.1002/hyp.7098>.
- 24- Liu R., Xu F., Zhang P., Yu W., and Men C. 2016. Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT. *Journal of Hydrology* 533: 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.024>.
- 25- Mengistu A.G., van Rensburg L.D., and Woyessa Y.E. 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 25: 100621. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621>.
- 26- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., and 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>.
- 27- Moriasi D.N., Gitau M.W., Pai N., and Daggupati P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- 28- Nash J., and Sutcliffe I. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- 29- Navratil O., Esteves M., Legout C., Gratiot N., Nemery J., Willmore S., and Grangeon T. 2011. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology* 398(3-4): 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.025>.
- 30- Neitsch S.L. 2005. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual Version 2005 476.
- 31- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J. 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.
- 32- Niraula R., Kalin L., Srivastava P., and Anderson C.J. 2013. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling* 268: 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.007>.
- 33- Noor H., Vafakhah M., Taheriyoun M., and Moghadasi M. 2014. Hydrology modelling in Taleghan mountainous watershed using SWAT. *Journal of Water and Land Development* 20(1): 11–18. <https://doi.org/10.2478/jwld-2014-0003>.
- 34- Prasannakumar V., Vijith H., Abinod S., and Geetha N.J.G.F. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers* 3(2): 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>.
- 35- Rahman K., Maringanti C., Beniston M., Widmer F., Abbaspour K., and Lehmann A. 2013. Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland. *Water Resources Management* 27(2): 323–339. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>.
- 36- Rostamian R., Jaleh A., Afyuni M., Mousavi S., Heidarpour M., Jalalian A., and Abbaspour K. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53(5): 977–988. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977>.
- 37- Singh V., and Goyal M.K. 2016. Analysis and trends of precipitation lapse rate and extreme indices over north Sikkim eastern Himalayas under CMIP5ESM-2M RCPs experiments. *Atmospheric Research* 167: 34-60. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.005>.
- 38- Talebizadeh M., Morid S., Ayyoubzadeh S.A., and Ghasemzadeh M. 2010. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. *Water Resources Management* 24(9): 1747–1761. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9522-2>.
- 39- Viviroli D., Du HH., Messerli B., Meybeck M., and Weingartner R. 2007. Mountains of the world , water towers for humanity: Typology, Mapping, and Global Significance 43:1–13. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>.
- 40- Wang W., Xie Y., Bi M., Wang X., Lu Y., and Fan Z. 2018. Effects of best management practices on nitrogen load reduction in tea fields with different slope gradients using the SWAT model. *Applied Geography* 90: 200-213. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.08.020>.
- 41- Williams J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 11(5): 965-974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>.
- 42- Wu F., Zhan J., Wang Z., and Zhang Q. 2015. Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 79: 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.08.002>.
- 43- Wu L., Long T yu., Liu X., and Ma X. 2013. Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the three Gorges reservoir area, China. *Environmental Earth Sciences* 70(3): 1405–1422. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2227-0>.
- 44- Zeiger S.J., and Hubbart J.A. 2016. A SWAT model validation of nested-scale contemporaneous stream flow, suspended sediment and nutrients from a multiple-land-use watershed of the central USA. *Science of The Total Environment* 572: 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.178>.
- 45- Zhang G., Su X., Ayantobo O.O., Feng K., and Guo J. 2021. Spatial interpolation of daily precipitation based on modified ADW method for gauge-scarce mountainous regions: A case study in the Shiyang River Basin. *Atmospheric Research* 247: 105167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105167>.