

# Evaluating the Impact of the Objective Function in Calibrating the SWAT Model Using the PSO Algorithm (Case Study: Estimating Runoff in the Karkheh Basin)

Maliheh Safavi<sup>1</sup>, Mahmoud Reza Mollaenia<sup>2</sup>, Abdorrahman Mostafaie<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>MSc Student, Civil Engineering Department, Faculty of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

<sup>2</sup>Associate professor, Civil Engineering Department, Faculty of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

<sup>3</sup>Assistant professor, Survey Engineering Department, Faculty of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: [a.mostafaie@uoz.ac.ir](mailto:a.mostafaie@uoz.ac.ir)

Received: 02 May 2025

Accepted: 10 July 2025

Revised: 05 Aug. 2025

Published: 13 Sep. 2025



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** Hydrological simulation of a watershed is challenging due to bias in input data, measurements, and the mismatch of spatial-temporal scales between the model and the physical system. We conducted a monthly runoff simulation to evaluate the effects of uncertainty propagation in the soil and water assessment tool (SWAT). We used the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to investigate the effects of the objective functions (NSE,  $R^2$ , and KGE) used to calibrate the hydrologic parameters in the Karkheh River watershed. In 18 sub-basins, 37 parameters were selected based on previous studies and parameter sensitivity analysis using the Latin Hypercube sampling method to simulate runoff in 6 hydrometric stations. The results showed an acceptable correlation between the simulated and observed flows. However, the best simulation occurred at Seymareh station.

**Keywords:** SWAT model, runoff simulation, objective function, NSE,  $R^2$ , KGE

**Introduction:** Simulation of hydrological processes at local, regional, and global scales has played a key role in addressing many environmental, social, and water resource management challenges. However, uncertainty in model output remains a limitation in simulating hydrological processes.

Various methods have used for hydrological modeling (Yuan et al., 2020), among of them, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) has widely used for assessing hydrological and pollutant impacts on water and land management (Prochnow et al., 2008; Meng et al., 2018; Kuma et al., 2023), evaluating ecosystem services (Nedkov et al., 2022; Uniyal et al., 2023), quantifying climate change impacts (Mandal et al., 2021), estimating soil erosion (dos Santos et al., 2023), evaluating management practices (Yuan and Koropecjy-Cox, 2022), analyzing the impact of land use and cover changes on river runoff (Martínez-Mena et al., 2020; Liu et al., 2024), simulation the hydrological characteristics of the watershed (Akbari et al., 2022 and Gasirabo et al., 2023).

Many parameters in the model structure are generally determined through calibration due to the high cost of field measurements. The spatial-temporal variations of parameters cause significant amounts of uncertainty in the results of water resources simulation and management; therefore, they must be calibrated to ensure accurate hydrological modeling (Akoko et al., 2021).

In this research, SWAT was used to simulate runoff in the Karkheh watershed. Three objective functions NSE,  $R^2$  and KGE were applied through PSO algorithm to calibrate the model. Then, the effect of aforementioned-objective functions was evaluated.

**Methodology:** The Karkheh Basin, located in western Iran (Fig. 1), has an area of about 50,764 km<sup>2</sup>. Approximately 80% of the basin area is in the Zagros Mountains, which produce almost all the surface runoff of the basin. Karkheh River, the third river in Iran, flows in the largest reservoir dam in Iran and the Middle East; it

has four main branches, including Gamasyab, Qarasu, Siamareh, and Kashkan. The Karkheh basin has a Mediterranean climate with cool, humid winters and hot, dry summers. The average annual rainfall varies from 150 mm/year in the lower dry plains to 750 mm/year in the mountainous parts (Masih, et. al., 2011).

Monthly temperature and precipitation data from 8 meteorological stations (Dehloran, Kermanshah, West Islamabad, Malayer, Borujerd, Khorramabad, Ilam, and Ahvaz), the map of land use, soil, and DEM of the region, and monthly discharge statistics from 6 hydrometric stations (Pol-Chehr, Doab-e-Vaisian, Ghorbaghistan, Seymareh, Pol-e-Dokhtar, and Pay-Pol) were applied to SWAT to build and calibrate the hydrological model of the Karkheh basin.

Particle Swarm Optimization (PSO) moves a collection of individuals called particles in steps throughout a region. It evaluates each particle's objective function at each step and decides on its new velocity until it takes optimum values. The modified PSO algorithm, introduced by Shi and Eberhart (1998), to the velocity update formula, can be presented by Eqns (1)-(2).

where  $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}]$  represents each individual particle;  $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,D}]$  represents the velocity of each particle  $P_{best}$  is the best position of each particle; and  $G_{best}$  is the best location of the total swarm., the experiences are augmented by two factors  $c_1$  and  $c_2$  and two random numbers generated between  $[0,1]$  while the motion is multiplied by an inertial factor varying between  $[w_{min}, w_{max}]$ .

To control and evaluate the ability of hydrological models to simulate a quantity, some criteria are usually used. In this study, the criteria of determination coefficient ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and Kling-Gupta efficiency coefficient (KGE) have been used to control and evaluate the ability of hydrological SWAT model, Eqns. (3)-(5).

**Results and Discussion:** Table 2 represents the value obtained at the Pol-Chehr station for the Nash-Sutcliffe,  $R^2$ , and KGE objective functions, which are 0.62, 0.62, and 0.68, respectively, and are satisfactory. The values of NSE and KGE are 0.64 and 0.60, respectively, where the  $R^2$  objective function is 0.67, which indicates good performance; they are greater than 0.5 (Van Leeuw et al., 2003). Furthermore, it is clear that, at this station, the  $R^2$  objective function is the best objective function for reflecting the proportionality of a hydrograph that can be considered.

The graph comparing the observed values with the best runoff simulations at Pol-e-Chehr station with all objective functions in Fig. 7 shows that in early 2004 and 2007, less runoff was simulated, and in early 2005, more, and that the results of using all functions generally coincide.

According to Table 3, at Qoorbaghistan station, using the KGE and NSE as the objective function for model calibration has led to satisfactory results, while using  $R^2$  objective function cause no satisfactory values of the NSE and KGE criteria with amount of 0.13 and 0.35, respectively, Fig. 8.

At the Doab-Visian station, the use of all three objective functions has yielded acceptable results (Table 4). Comparing the observed runoff, Fig. 9 shows the best runoff simulations at this hydrometric station with different objective functions. It is observed that although the simulation values are consistent, the maximum runoff values are not well estimated.

Table 5 reveals that all the objective functions have good results at the Simareh station. The simulation results for this station are better than those obtained for the other stations studied. Comparing the observed values with the best runoff simulations of this hydrometric station with three objective functions (Fig. 10) indicates the coincidence of the results.

At Pol-e Dokhtar station, the results obtained by all objective functions are good, and comparison conducted between the observed and the best runoff simulations values (Fig. 11) shows that at the peak points, estimated runoff using the KGE and  $R^2$  functions are more than what projected by the NSE.

**Conclusion:** This research applied SWAT to estimate the runoff flowing in the Karkheh Basin, then conducted the PSO method to calibrate the SWAT model using objective functions of  $R^2$ , NAS, and KGE. The results showed the most observational data and the highest band thickness at the Qoorbaghestan station, in contrast to the lowest band thickness and percentage of measured data obtained at the Doab-Visian station. The highest value of the Nash-Sutcliffe objective function for the Simireh station, 0.66, indicates that the best simulation performance belongs to this station, which is in the range of good results. Simultaneously, the values of  $R^2$  and KGE objective

functions are 0.68 and 0.81, respectively, representing the best results in this study.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# ارزیابی تاثیر تابع هدف در واسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم PSO (مطالعه موردی: برآورد رواناب حوضه آبریز کرخه)

ملیحه صفوی<sup>۱</sup>، محمود رضا ملائی نیا<sup>۲</sup>، عبدالرحمان مصطفائی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل

<sup>۲</sup>دانشیار گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل

<sup>۳</sup>استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [a.mostafaie@uoz.ac.ir](mailto:a.mostafaie@uoz.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

**چکیده:** تاثیر تابع هدف در واسنجی پارامترهای مدل SWAT به اثبات رسیده است. در این مقاله اثر تغییر تابع هدف در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور مدل حوضه آبریز کرخه در مدل SWAT شبیه‌سازی و پارامترهای مؤثر تعیین گردید. سه تابع NSE،  $R^2$  و KGE به‌عنوان توابع هدف در الگوریتم PSO جهت ارزیابی دقت شبیه‌سازی رواناب توسط این مدل استفاده شد. شبیه‌سازی رواناب به‌صورت ماهانه در حوضه آبخیز رودخانه کرخه، ۱۸ زیرحوضه، انجام گردید. جهت ارزیابی پاسخ مدل از داده‌های رواناب در ۵ ایستگاه هیدرومتری حوضه کرخه استفاده شد. براساس مطالعات پیشین و تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها با استفاده از روش نمونه‌برداری فرا مکعب لاتین، ۳۷ پارامتر انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ مدل براساس پارامترهای انتخاب‌شده با رواناب مشاهده‌شده در ایستگاه‌های پنجگانه همبستگی یکسانی دارد. با تغییر تابع هدف الگوریتم PSO در فرآیند واسنجی مدل مشخص شد توابع هدف در ایستگاه‌های پنجگانه از کارایی متفاوتی برخوردارند براین اساس KGE از قابلیت تخمین بهتر رواناب در تمام ایستگاه‌ها برخوردار است؛ و محاسبه NSE و  $R^2$  با استفاده از نتایج حاصل از KGE مطلوب است. ولی  $R^2$  (ضعیف‌ترین تابع هدف) در ایستگاه قورباغستان نتایج غیرقابل قبولی برای معیارهای NSE و KGE در پی دارد.

**کلیدواژگان:** مدل SWAT، شبیه‌سازی رواناب، تابع هدف، NSE،  $R^2$ ، KGE

## ۱- مقدمه

باشد. شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی نقش کلیدی در پرداختن به طیف وسیعی از چالش‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و مدیریت منابع آب ایفا کرده است. علیرغم علاقه فزاینده به

توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی با ماهیت، پیچیدگی و هدف متفاوت، شاید یک دستاورد استثنایی در دهه‌های اخیر

یک مدل معمولا شامل انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی، یک تابع هدف و یک یا چند معیار برای ارزیابی کارایی مدل است. معیارهای مورداستفاده برای ارزیابی مدل اغلب به‌عنوان توابع هدف استفاده می‌شود.

با توجه به تغییر اقلیم، تلاش‌های علمی زیادی برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی برای سناریوهای آینده انجام شده است (Peel et al., 2011). جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آینده، تولید مدل‌های خوب واسنجی شده ضروری است. واسنجی مدل فرآیند شناسایی یک مجموعه پارامتر مناسب برای به حداقل رساندن تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است که توسط تابع هدف نشان داده می‌شود (Misgana, 2012)؛ بنابراین، یک تابع هدف عالی همیشه ستون فقرات یک نتیجه علمی رضایت‌بخش است. جهت اطمینان از تناسب عملکرد مدل هیدرولوژیکی در واسنجی، معیارهای آماری زیادی به‌عنوان معیارهای کارایی (یعنی توابع هدف) در دهه‌های گذشته به‌جای قضاوت بصری ذهنی پیشنهاد شده است (Green & Bennett, et ; Dawson, et al., 2007; Stephenson, 1986; al., 2013). به‌طور کلی نشان داده شده است که (۱) نتایج واسنجی مدل تا حد زیادی به تابع هدف بستگی دارد و (۲) توابع هدف مختلف، مورداستفاده جهت اجزای مختلف آب-سنجی هستند (Green & Stephenson, 1986; Legates & McCabe, 1999; Krause, et. al., 2005; Dawson, et. al., 2007).

با توجه به تجربی بودن توابع هدف مورداستفاده، هنوز در انتخاب تابع هدف مناسب مشکلاتی وجود دارد. به‌عنوان مثال، اگرچه بسیاری از پژوهش‌گران معتقدند که پرکاربردترین تابع هدف، سنجه نش-ساتکلیف (NSE)، نش و ساتکلیف (۱۹۷۰)، است چراکه تاکید بیشتری بر مقادیر بالای جریان (سیل) نسبت به مقادیر جریان پایه دارد (Legates & McCabe, 1999; Krause et al., 2005;) ولی (Guinot et al., 2011; Pushpalatha et al., 2012) تاکنون هیچ توضیح رضایت بخشی در مورد سنجه NSE ارائه نشده است.

در سطح جهانی، محققان از مدل SWAT در مسائل

مدل‌سازی حوضه، عدم قطعیت در خروجی مدل همچنان یک محدودیت در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی است.

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود، از جمله سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP)، سیستم آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی (AGNPS) و ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) (Yuan et al., 2020). از این مدل‌ها، مدل SWAT که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA) ایجاد شده است، ابزاری پرکاربرد برای شبیه‌سازی رواناب، آلودگی منبع غیرنقطه‌ای، رسوب و سایر فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی تحت محیط‌های متغیر (جریان آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، ذوب برف و غیره) است (Fard and Sarjoughian, 2021). این مدل نیمه توزیعی یک چارچوب مناسب و سازگار جغرافیایی برای تخمین چگونگی اثرگذاری روش‌های مختلف مدیریت زمین بر رواناب، فرسایش خاک و تولید محصول ارائه می‌کند (Martínez-Mena et al., 2020). در ساختار این مدل تعداد زیادی پارامتر وجود دارد که به‌دلیل هزینه بالای اندازه‌گیری‌های میدانی، عموماً از طریق واسنجی تعیین می‌شوند.

تغییرات مکانی-زمانی در مقادیر بهینه این پارامترها مقدار قابل توجهی از عدم قطعیت را در نتایج شبیه‌سازی منابع آب و مدیریت آن نشان می‌دهد. پارامترهای متعدد مربوط به تجزیه خاک، رواناب و کیفیت آب باید واسنجی شده تا از مدل‌سازی دقیق هیدرولوژیکی با استفاده از SWAT اطمینان حاصل شود (Akoko et al., 2021). بنابراین، استفاده از رویه واسنجی مناسب برای اصلاح پارامترهای مؤثر بر خروجی‌های مدل SWAT و فن‌های تحلیل عدم قطعیت ضروری است.

واسنجی می‌تواند از مقایسه بصری بین هیدروگراف‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده استفاده کند، اما این فن ذهنی، وابسته به قضاوت متخصص و بازتولید آن دشوار است (Crochemore et al. 2015). واسنجی با معیارهای عددی به‌دلیل قابل تکرار بودن، عینیت بیشتری دارد و به‌راحتی توضیح داده می‌شود (Krause et al. 2005). واسنجی عددی

مساحت در غرب ایران (شکل ۱) واقع است، رودخانه اصلی آن رودخانه کرخه، سومین رود پرآب ایران است. بزرگ‌ترین سد مخزنی ایران و خاورمیانه روی این رودخانه ساخته شده که یکی از نیروگاه‌های برقابی مهم کشور نیز در آن است. تقریباً ۸۰ درصد از مساحت حوضه در رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد که تقریباً تمام رواناب سطحی حوضه را تولید می‌کند.

رودخانه کرخه چهار شاخه اصلی دارد: گاماسیاب، قره‌سو، سیمره و کشکان. رودخانه کرخه پس از تلاقی سیمره و کشکان آغاز می‌شود و سپس به سمت دشت‌های خوزستان به باتلاق هورالعظیم، تالاب بزرگ فرامرزی مشترک با عراق و متصل به حوضه فرات-دجله، می‌ریزد.

حوضه کرخه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با زمستان‌های خنک و مرطوب و تابستان‌های گرم و خشک است. میانگین بارندگی سالانه از ۱۵۰ میلی‌متر در سال در دشت‌های خشک پایین‌تر تا ۷۵۰ میلی‌متر در سال در بخش‌های کوهستانی متغیر است. به‌طور میانگین، بخش میانی نسبت به بخش‌های بالا و پایین بارندگی بیشتری دارد که در رکوردهای کرمانشاه (۴۵۰ میلی‌متر در هکتار)، خرم‌آباد (۵۱۰ میلی‌متر در هکتار) و اهواز (۲۳۰ میلی‌متر در هکتار) نشان داده شده است. حدود ۶۵ درصد بارش در زمستان می‌بارد و تقریباً در تابستان مقدار بارش برابر صفر است (Masih, et al., 2011).

## ۲-۲- معرفی مدل SWAT

مدل SWAT ابزاری کارا برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مرتع و اثرات تغییر اقلیم است. مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی پیوسته و نیمه‌توزیعی با پایه فیزیکی است که در سازمان تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه یافت (توسط آرنولد و همکاران، ۱۹۹۸)؛ و به‌صورت نرم‌افزاری متن‌باز ارائه شده است. این مدل پارامترهای هواشناسی (دما، بارش باران و برف، باد و ...)، داده‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی، مرزهای حوضه آبریز، داده‌های کیفیت آب و کاربری اراضی در حوضه آبریز را دریافت می‌کند.

متعددی استفاده کرده‌اند. این کاربردها شامل ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی و آلاینده ناشی از مدیریت آب و زمین (Prochnow et al., 2008; Kuma et al., 2023)، تجزیه و تحلیل آلاینده‌ها (Meng et al., 2018)؛ ارزیابی خدمات اکوسیستمی (Nedkov et al., 2022; Uniyal et al., 2023)، کمی‌سازی اثرات تغییرات آب‌وهوا (Mandal et al., 2021)، برآورد فرسایش خاک (dos Santos et al., 2023) و ارزیابی شیوه‌های مدیریتی (Yuan and Koropeckyj-Cox, 2022)، اثر تغییرات کاربری و پوشش زمین بر روی رواناب رودخانه‌ها (Liu et al., 2024) و تنفس خاک (Bhanja et al., 2019; Melaku et al., 2022). همچنین، در مطالعات زیادی از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوزه آبریز بهره گرفته شده است (Gasirabo et al., 2023 و Akbari et al., 2022).

مطالعات متنوعی در خصوص شبیه‌سازی رواناب در حوضه کرخه با استفاده از مدل SWAT و واسنجی با الگوریتم SUFI2 انجام شده است ولی با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در پیشینه پژوهش، تاکنون بررسی اثر تابع هدف در نتایج شبیه‌سازی رواناب توسط مدل ایجاد شده از حوضه کرخه در SWAT و واسنجی شده با روش PSO صورت نگرفته است؛ از این‌رو، در این مقاله از مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) جهت شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز کرخه استفاده شد. سه سنجه  $R^2$ ، NSE و KGE به‌عنوان توابع هدف الگوریتم PSO جهت واسنجی مدل و بررسی عدم قطعیت پارامترهای آن به کار رفت و اثر هر یک بر میزان رواناب ارزیابی گردید. همچنین، مدل SWAT و حوضه کرخه معرفی و داده‌های مورد استفاده تشریح شده است. سرانجام، نتایج واسنجی مدل مذکور روی حوضه کرخه جهت شبیه‌سازی رواناب ارائه شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کرخه با حدود ۵۰۷۶۴ کیلومترمربع

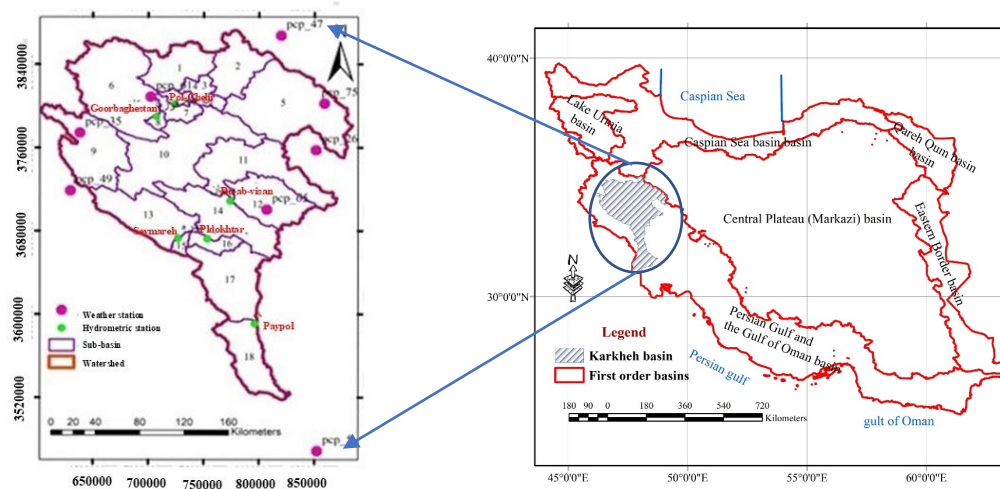


Fig. 1 Right: Location of Karkheh basin within first order hydrology basins of Iran. Left: Karkheh sub-basins made in SWAT, the location of used meteorological and hydrometric stations.

شکل ۱ راست: موقعیت حوضه کرخه در بین حوضه‌های آبریز درجه یک، چپ: زیرحوضه‌های حوضه کرخه ایجاد شده در مدل SWAT. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده.

کانال اصلی رودخانه و سرانجام، میزان رواناب خروجی را محاسبه می‌شود.

SWAT، مدلی در مقیاس آبخیز بزرگ و یا زیرحوضه است. جهت کاربرد آسان و افزایش قابلیت‌های مدل، امکان کار با حجم زیاد داده‌ها و اطلاعات و ارائه خروجی‌های گرافیکی و جدول‌های این مدل به صورت نرم‌افزار فراهم شده است؛ که پس از نصب به صورت یک نواریز به نام Arc SWAT در نرم‌افزار Arc GIS مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل بر اساس حل معادلات اساسی فیزیکی به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و مطالعه فرآیندهای سیستم هیدرولوژی منطقه می‌پردازد و مبنای فیزیکی روابط موجود در این مدل منجر به ازدیاد تعداد متغیرهای لازم برای اجرای کامل و دقیق مدل می‌شود.

شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژیکی در این مدل به دو قسمت اصلی فاز زمین (انتقال آب، رسوب، مواد مغذی و آفت‌کش به درون کانال اصلی در هر زیرحوضه) و فاز روندیابی (حرکت آب، رسوب، مواد مغذی و آلاینده‌ها در شبکه کانال آبخیز تا خروجی) تقسیم می‌شود. در فاز زمین براساس رابطه (۱) [بیان آبی](#) چرخه هیدرولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود.

در مدل SWAT، حوضه آبخیز اصلی با استفاده از نقشه رستری مدل رقومی ارتفاع، به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود که این زیرحوضه‌ها از نظر مکانی باهم ارتباط دارند برای مثال خروجی از سراب زیرحوضه شماره N ممکن است که به پایاب زیرحوضه شماره N+1 وارد شود. سپس، بر مبنای نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و توپوگرافی، زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تری، از نظر هیدرولوژی تا حد امکان همگن، تقسیم می‌شوند که به هر کدام از این واحدها یک HRU گفته می‌شود (Safavi, 2021). از این رو، تعداد واحدهای HRU در هر زیرحوضه، با توجه به تنوع خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی متغیر است. خروجی رواناب سطحی در هر زیرحوضه از جمع رواناب سطحی محاسبه شده برای هر HRU، به روش متوسط وزنی به دست می‌آیند.

در مدل SWAT با استفاده از یک چرخه کاملاً شبیه چرخه هیدرولوژیکی طبیعت، پس از دریافت بارش با استفاده از روش شماره منحنی میزان رواناب محاسبه؛ سپس، با توجه به دما، سرعت باد و تشعشع خورشیدی و عوامل دیگر میزان تبخیر و تعرق، نفوذ در خاک، نفوذ به سفره زیرزمینی، سرعت حرکت آب در سفره زیرزمینی، سرعت حرکت در

کرخه، از روش فراابتکاری PSO استفاده شده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) از رفتار اجتماعی و تعاونی که توسط گونه‌های مختلف برای پرکردن نیازهایشان در فضای جستجو نمایش داده می‌شود، می‌گیرد. این الگوریتم به‌وسیله تجربه شخصی (Pbest) تجربه کلی (Gbest) و حرکت فعلی ذرات برای تصمیم‌گیری در موقعیت بعدی خود در فضای جستجو هدایت می‌شود. علاوه بر این، تجربیات توسط دو عامل  $c_1$  و  $c_2$  رشد داده می‌شوند و دو عدد تصادفی تولیدشده بین  $[0,1]$  درحالی‌که این حرکت با ضریب اینرسی که بین  $[W_{min}, W_{max}]$  متغیر است ضرب می‌شود.

جمعیت اولیه (ازدحام) به اندازه  $N$  و بعد  $D$  به صورت  $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$  نشان داده می‌شود؛ در آن  $T$  نشان‌دهنده عملگر ترانهاده است. هر فرد (ذره)  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) به‌عنوان  $X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}]$  ارائه می‌شود. همچنین، سرعت اولیه جمعیت به صورت  $V = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$  مشخص می‌شود. بنابراین، سرعت هر ذره به‌عنوان  $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,D}]$  شاخص  $i$  از  $1$  تا  $N$  متغیر است درحالی‌که شاخص  $j$  از  $1$  تا  $D$  متغیر است. الگوریتم‌های تفصیلی با رابطه‌های ((۳)) و ((۴)) توصیف می‌شوند.

$$V_{i,j}^{k+1} = w \times V_{i,j}^k + c_1 \times r_1 \times (Pbest_{i,j}^k - X_{i,j}^k) + c_2 \times r_2 \times (Gbest_j^k - X_{i,j}^k) \quad (3)$$

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^k + V_{i,j}^{k+1} \quad (4)$$

در رابطه (۱)  $Pbest_{i,j}^k$  نمایانگر بهترین عملکرد  $j$ -امین شخص از مؤلفه فردی  $i$ -ام، درحالی‌که  $Gbest_j^k$  نمایشگر جز نام بهترین فرد برای کلیه تکرارها تا تکرار  $k$ -ام است. مقدار پارامترهای الگوریتم PSO به شرح زیر است:

- ♦ وزن اینرسی:  $0.9$  تا  $0.4$
- ♦ عوامل شتاب ( $c_1$  و  $c_2$ ):  $2$  تا  $2.05$
- ♦ میزان جمعیت:  $10$  تا  $100$
- ♦ حداکثر تکرار (Maxite):  $500$  تا  $10000$
- ♦ سرعت اولیه:  $10$  درصد موقعیت

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

که در آن  $SW_t$  مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)،  $SW_0$  مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)،  $R_{day}$  مقدار بارندگی (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)،  $W_{seep}$  مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع وارد می‌شود (میلی‌متر)،  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) در روز  $t$ -ام است.

روندیابی در این مدل با توجه به مشخصات کانال اصلی صورت می‌گیرد. مدل کانال اصلی به شکل دوزنقه و با شیب کناری  $۱:۲$  در نظر گرفته و عرض کف کانال از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$b = T - 2 \cdot Z \cdot d \quad (2)$$

در این رابطه،  $b$  عرض کانال (متر)؛  $T$  عرض بالای کانال (متر)؛  $Z$  شیب کناره‌ها؛ و  $d$  عمق کانال است. مدل برای برآورد سرعت و دبی در کانال اصلی از معادله مانینگ استفاده می‌کند. روندیابی کانال شامل پنج قسمت اصلی روندیابی جریان، رسوب، مواد مغذی، آفت‌کش‌ها و روندیابی در مخازن است.

### ۲-۳- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق داده‌های ماهانه دما و بارندگی در ۸ ایستگاه هواشناسی (دهلران، کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، ملایر، بروجرد، خرم‌آباد، ایلام و اهواز)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، نقشه DEM منطقه و آمار ماهانه دبی ۶ ایستگاه آب‌سنجی (پل‌چهر، دوآب و بیسان، غورباقستان، سیمره، پل‌دختر، پای پل) جهت ساخت و واسنجی مدل هیدرولوژیکی حوضه کرخه توسط SWAT استفاده گردید. موقعیت جغرافیایی حوضه کرخه، زیرحوضه‌های ساخته‌شده در مدل SWAT، ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در شکل ۱ نمایش داده شده است.

### ۲-۴- روش PSO

جهت واسنجی مدل هیدرولوژی ساخته‌شده در حوضه

## ۲-۵- توابع هدف

در رابطه (۷)،  $\alpha = \sigma_s / \sigma_o$  و  $\beta = \bar{Q}_s / \bar{Q}_m$  که  $\sigma_o$  و  $\sigma_s$  به ترتیب انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهدات،  $r$  نیز ضریب همبستگی است.

جهت کنترل و ارزیابی توانایی مدل‌های هیدرولوژی در شبیه‌سازی یک کمیت، معمولا از معیارهایی مبتنی بر مقادیر کمیت شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی نظیر آن کمیت استفاده می‌شود. در این مطالعه از معیارهای ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شده است که در ادامه نحوه محاسبه هر تابع ارائه شده است. مقدار ضریب تعیین از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m)(Q_{xi} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i(Q_{xi} - \bar{Q}_s)^2} \quad (5)$$

## ۳- نتایج و بحث

روش PSO با ۴۵۰۰ شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل عدم اطمینان انجام شد. برای مقایسه بهتر، حداقل آستانه عملکرد تابع هدف ۰/۵ انتخاب شد. محدوده پارامترهای اولیه مورد استفاده در روش PSO با توجه به مقادیر پیش فرض نرم‌افزار SWAT-CUP انتخاب شده است.

مقدار ضریب ناش-ساتکلیف، رابطه (۶)، از منفی بی‌نهایت تا ۱ تغییر است. مقدار بهینه این شاخص ۱ است؛ اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل دارای توانایی شبیه‌سازی خوبی است؛ و مقدار آن منفی باشد بهتر است به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. به‌طور کلی، مقادیر ناش-ساتکلیف بیشتر از ۷۵ درصد را عالی و مقادیر بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ را رضایت‌بخش بیان شده است (Geza & McCray, 2008).

**جدول ۱** خلاصه آماری معیارهای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، مانند NSE،  $R^2$ ، KGE، P-Factor و r-factor را نشان می‌دهد که اندازه‌گیری ۲۹٪ در ایستگاه پل‌چهر، ۵۹٪ اندازه‌گیری در ایستگاه قورباغستان، ۲۷٪ اندازه‌گیری در ایستگاه دوآب ویسیان، ۵۹٪ اندازه‌گیری در ایستگاه سیمره، ۲۷٪ اندازه‌گیری در ایستگاه پل‌دختر توسط PPU۹۵ مهار شده است.

$$NS = 1 - \frac{\sum_i(Q_{mi} - Q_{si})^2}{\sum_i(Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2} \quad (6)$$

به‌منظور ارزیابی اثر تابع هدف در واسنجی مدل SWAT با روش PSO واسنجی با استفاده از هر یک از توابع هدف ضریب تعیین، نش-ساتکلیف و گوپتا انجام و مقایسه نتایج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از معیارهای آماری مانند ضریب تعیین، نش-ساتکلیف و گوپتا در ایستگاه‌های هیدرومتری ارائه شد. **شکل‌های ۲ تا ۶** هیدروگراف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به‌دست‌آمده با روش PSO را نشان می‌دهد که PPU۹۵ را توصیف می‌کند.

ضریب KGE، در حقیقت بهبودیافته ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) است. هنگام واسنجی مدل کمیت KGE به‌عنوان معیاری کلی برای ارزیابی توافق بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها به‌کار می‌رود. ضریب KGE از رابطه (۷) قابل محاسبه است.

## ۳-۱- مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در

## ایستگاه پل‌چهر

با توجه به **جدول ۲** در ایستگاه پل‌چهر مقداری که برای تابع هدف نش-ساتکلیف به‌دست‌آمده ۰/۶۲ است و مقداری که برای معیارهای ارزیابی توابع هدف  $R^2$  و KGE به‌دست‌آمده ۰/۶۲ و ۰/۶۸ است که از معیار شبیه‌سازی خوب (مقدار ۰/۷۵)، کمتر است ولی رضایت‌بخش تفسیر می‌شود.

$$KGE = 1 - \frac{1}{\sqrt{(r-1)^2 + (a-1)^2 + (\beta-1)^2}} \quad (7)$$

در رابطه‌های (۵) و (۶)،  $\bar{Q}_m$  متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{Q}_s$  متوسط مقادیر مشاهده‌ای است.  $Q_{mi}$  مقدار شبیه‌سازی شده برای نقطه نام،  $Q_{si}$  مقدار مشاهده‌ای برای نقطه نام است.

جدول ۱ معیارهای ارزیابی رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری دوره واسنجی روش PSO

Table 1 Runoff evaluation criteria in hydrometric stations during the calibration period using PSO method.

Stations	Evaluation criteria				
	KGE	R <sup>2</sup>	r-factor	P-factor	NSE
Pol-e Chehr	0.62	0.29	0.43	0.62	0.64
Qorbaghestan	0.53	0.59	0.62	0.55	0.73
DoAb-e Visan	0.55	0.27	0.27	0.55	0.68
Seimareh	0.66	0.36	0.30	0.68	0.81
Pol-e Dokhtar	0.67	0.47	0.40	0.68	0.82

جدول ۲ مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه پل چهر

Table 2 Comparison of the effect of the objective function in the PSO method, at Pul-Chehar station.

Station	Objective Function (OF)	OF Values	OF Max	OF Min	OF Mean	Evaluation Criteria		
						NSE	NSE	NSE
Pol-e Chehr	NSE	0.62	195.1	0.83	20.44	---	0.62	0.64
	R <sup>2</sup>	0.67	212.0	0.61	23.27	0.64	---	0.60
	KGE	0.65	199.5	0.67	20.17	0.61	0.61	---

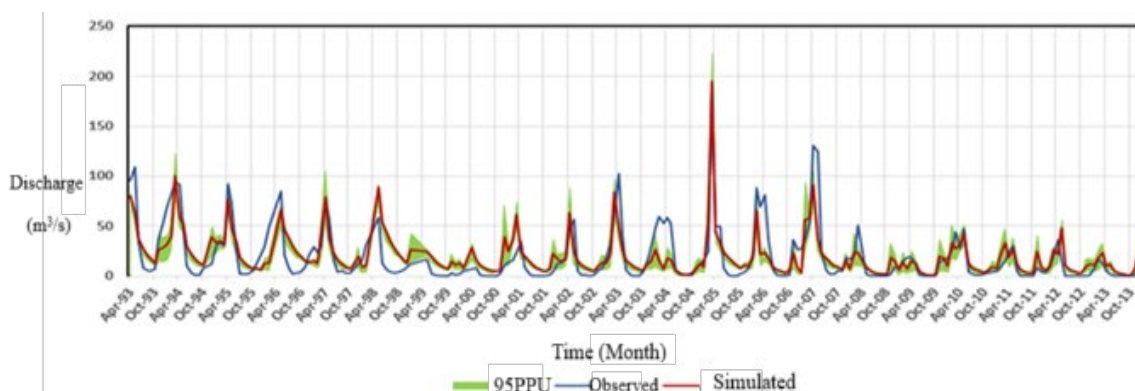


Fig. 2 Comparison of observed and simulated runoff at Pol-Chehr station using PSO method during calibration period. شکل ۲ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه پل چهر در دوره واسنجی روش PSO.

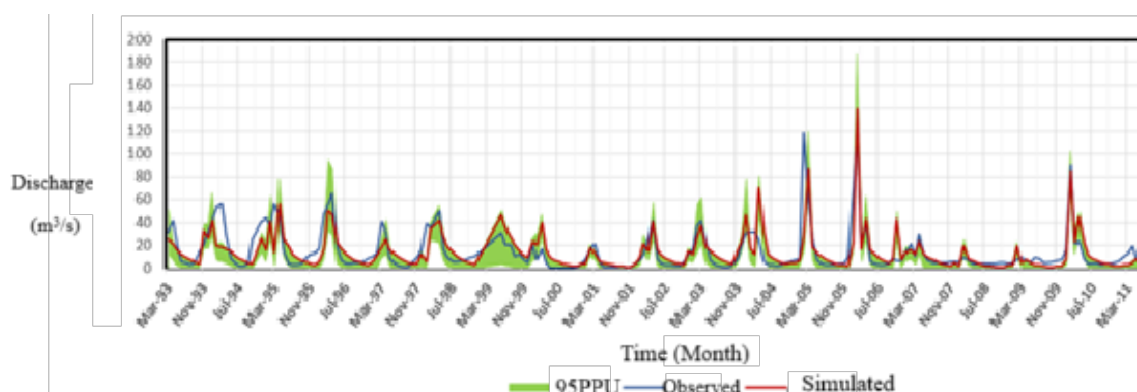


Fig. 3 Comparison of observed and simulated runoff at Goorbaghestan station using PSO method during calibration period. شکل ۳ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه قورباغستان در دوره واسنجی روش PSO.

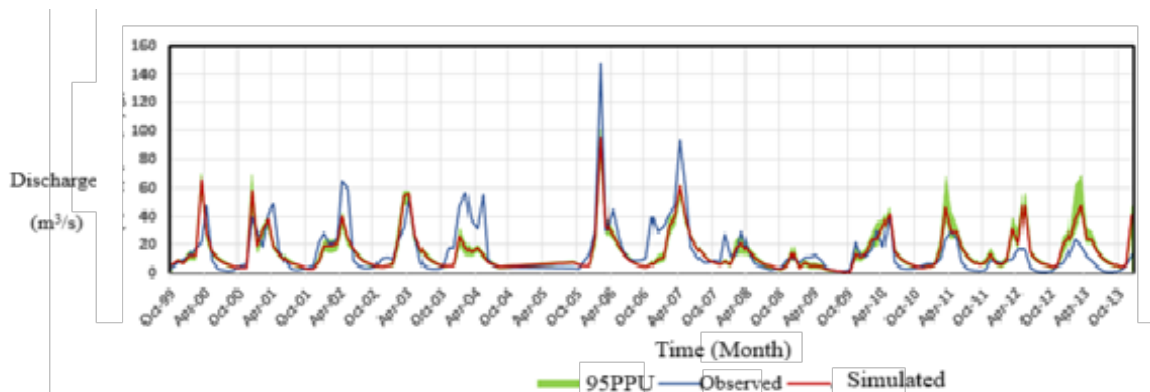


Fig. 4 Comparison of observed and simulated runoff at Do-ab-visan station using PSO method during calibration period.  
 شکل ۴ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه دوآب ویسیان در دوره واسنجی روش PSO.

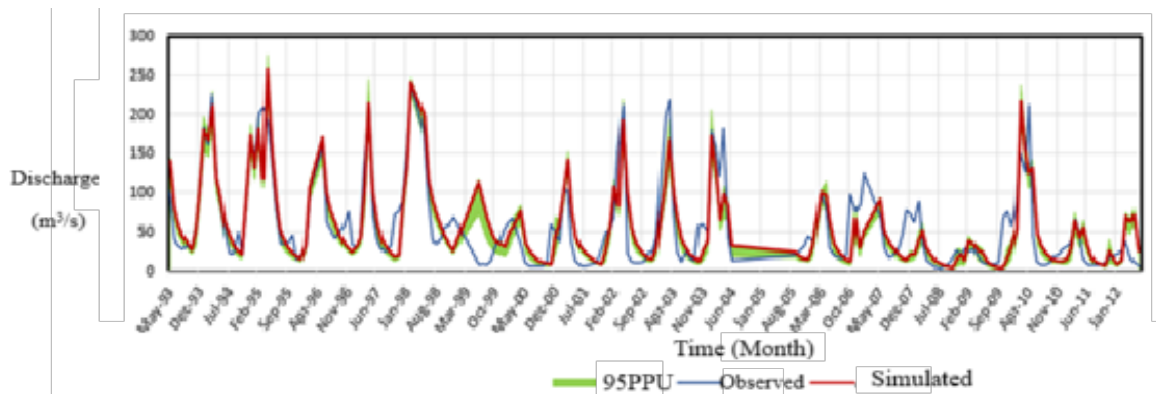


Fig. 5 Comparison of observed and simulated runoff at Seymarch station using PSO method during calibration period.  
 شکل ۵ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه سیمره در دوره واسنجی روش PSO.

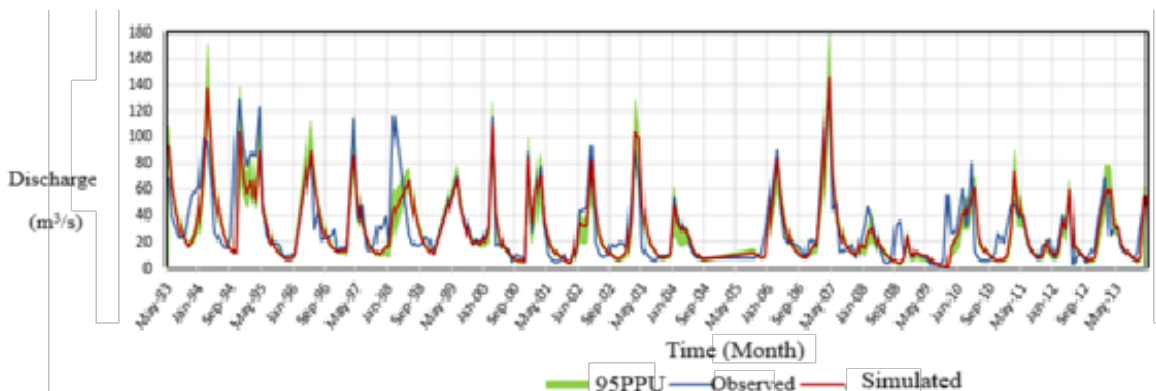


Fig. 6 Comparison of observed and simulated runoff at Pldokhtar station using PSO method during calibration period.  
 شکل ۶ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه پلدختر در دوره واسنجی روش PSO.

گرفت که حاصل آن ۰/۶۵ است که از توابع دیگر ۰/۶۱ به دست آمده که مبنای خوب بودن را دارد. از نتایج به دست آمده این گونه می‌توان نتیجه گرفت که در این ایستگاه با تابع هدف  $R^2$  را بهترین عملکرد هدف برای انعکاس متناسب بودن یک هیدروگراف دانست.

ارزش به دست آمده از تابع هدف  $R^2$ ، ۰/۶۷ است و مقداری که از دو تابع دیگر برای این ضریب به دست آمده ۰/۶۴ و ۰/۶۰ است که نشان دهنده عملکرد خوب مدل ایجاد شده در شبیه‌سازی (بزرگ‌تر از ۰/۵) است (وان لئو و همکاران، ۲۰۰۳). در انتها تابع هدف KGE مورد ارزیابی قرار

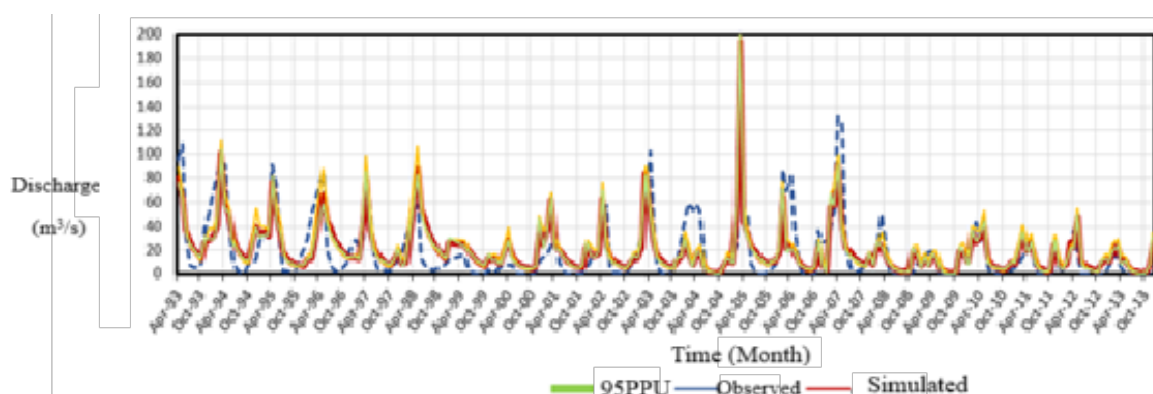


Fig. 7 Comparison of observed and simulated runoff using PSO method at Pol-Chehr station.

شکل ۷ مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ها در روش PSO در ایستگاه پل‌چهر

جدول ۳ مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه قورباغستان

Table 3 Comparison of the effect of the objective function in the PSO method, at Goorbaghestan station

Station	Objective Function (OF)	OF Values	OF Max	OF Min	OF Mean	Evaluation Criteria		
						NSE	NSE	NSE
Qurbaghestan	NSE	0.53	139.5	0.88	13.94	---	0.55	0.73
	R <sup>2</sup>	0.61	197.8	0.0012	12.92	0.13	---	0.35
	KGE	0.76	156.3	0.56	14.69	0.52	0.58	---

توابع KGE و NSE جهت واسنجی نتایج قابل‌قبولی دارد. نمودار مقایسه رواناب مشاهداتی با بهترین شبیه‌سازی‌های رواناب ایستگاه قورباغستان به کمک توابع هدف (شکل ۸) نشان‌دهنده این است که نتایج حاصل از تابع هدف R<sup>2</sup> نسبت به دو تابع هدف دیگر در اغلب موارد در شبیه‌سازی رواناب حداقل و حداکثر با مشاهدات کمترین انطباق را دارد.

### ۳-۳- مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه دوآب ویسیان

در ایستگاه دوآب ویسیان استفاده از هر سه تابع هدف نتایج قابل‌قبولی را در پی داشته است (جدول ۴) و با توجه به شکل ۹، مقایسه رواناب مشاهداتی با بهترین شبیه‌سازی‌های رواناب در این ایستگاه هیدرومتری با توابع هدف مختلف مشاهده می‌شود که علی‌رغمی که مقادیر شبیه‌سازی بر هم منطبق هستند ولی مقادیر ماکزیمم رواناب در موارد متعددی به‌خوبی برآورد نشده است.

نمودار مقایسه مقادیر مشاهداتی با بهترین شبیه‌سازی‌های رواناب در ایستگاه پل‌چهر با توابع هدف مختلف در شکل ۷، نشان‌دهنده این است که در اوایل سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷، رواناب کمتر و در اوایل سال ۲۰۰۵ بیشتر شبیه‌سازی‌شده، همچنین به‌طور کلی نتایج استفاده از توابع مختلف بر هم منطبق است.

### ۳-۲- مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه قورباغستان

با توجه به جدول ۳، در ایستگاه قورباغستان استفاده از توابع KGE و NSE به‌عنوان تابع هدف در واسنجی مدل منجر به نتایج قابل‌قبول در دو معیار دیگر شده است ولی علی‌رغم حصول مقدار ۰/۶۱ (قابل‌قبول) برای تابع هدف R<sup>2</sup> در واسنجی معیارهای NSE و KGE (به‌ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۳۵) نتایج غیرقابل‌قبول است.

نتایج جدول ۳ و شکل ۸ حاکی از این است که استفاده از

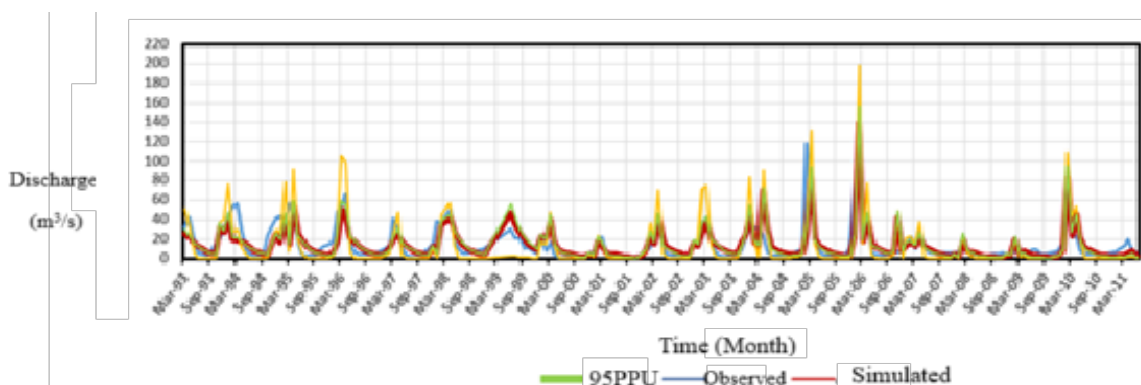


Fig. 8 Comparison of observed and simulated runoff using PSO method at Goorbaghestan station. شکل ۸ مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ها در روش PSO در ایستگاه قورباغستان.

جدول ۴ مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه دوآب ویسیان

Table 4 Comparison of the effect of the objective function in the PSO method, at Do-ab-visyan station

Station	Objective Function (OF)	OF Values	OF Max	OF Min	OF Mean	Evaluation Criteria		
						NSE	NSE	NSE
DoAb-e	NSE	0.55	94.99	0.61	15.26	---	0.55	0.68
	R <sup>2</sup>	0.55	93.56	0.52	15.05	0.55	---	0.67
Vesan	KGE	0.67	91.96	0.46	14.36	0.54	0.55	---

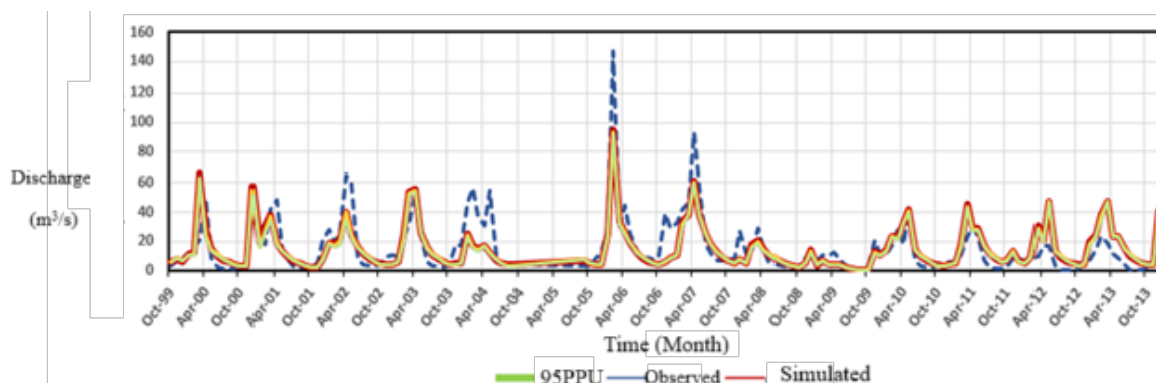


Fig. 9 Comparison of observed and simulated runoff using PSO method at Do-ab-visyan station. شکل ۹ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ها در روش PSO در ایستگاه دوآب ویسیان.

۳-۴- مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه سیمره

با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که تمام توابع هدف دارای نتایج خوب است. شبیه‌سازی در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه نتایج بهتری را داشته و نمودار مقایسه مقادیر مشاهداتی با بهترین شبیه‌سازی‌های رواناب این ایستگاه هیدرومتری با توابع هدف مختلف (شکل ۱۰)، حاکی از انطباق نتایج استفاده از هر سه تابع هدف با یکدیگر و عدم موفقیت در شبیه‌سازی مناسب در سال

۱۹۹۹ است.

۳-۵- مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه پل دختر

در این ایستگاه تمام توابع هدف دارای نتایج خوب است و نمودار مقایسه مقادیر مشاهداتی با بهترین شبیه‌سازی‌های رواناب ایستگاه پل دختر با توابع هدف مختلف (شکل ۱۱) نشان‌دهنده این است که در نقاط اوج، رواناب توابع KGE و R<sup>2</sup> نسبت به NSE از توانایی بیشتری برخوردار هستند

جدول ۵ مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه سیمره.

Table 5 Comparison of the effect of the objective function in the PSO method, at Seymareh station.

Station	Objective Function (OF)	OF Values	OF Max	OF Min	OF Mean	Evaluation Criteria		
						NSE	NSE	NSE
Seimareh	NSE	0.66	216.40	2.87	56.36	---	0.68	0.81
	R <sup>2</sup>	0.73	240.60	1.52	57.13	0.66	---	0.83
	KGE	0.83	232.20	2.25	56.05	0.68	0.70	---

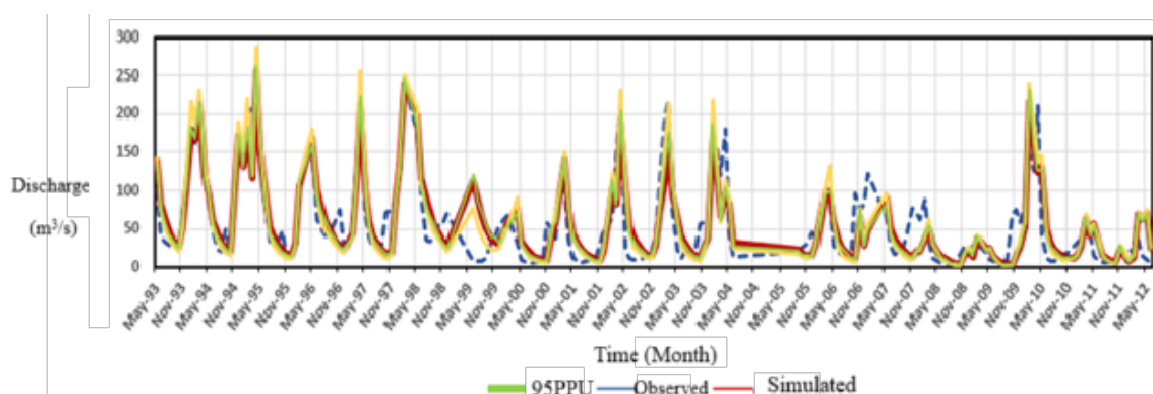


Fig. 10 Comparison of observed and simulated runoff using PSO method at Seymareh station.

شکل ۱۰ مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ها در روش PSO در ایستگاه سیمره

جدول ۶ مقایسه اثر تابع هدف در روش PSO در ایستگاه پل دختر.

Table 6 Comparison of the effect of the objective function in the PSO method, at Pldokhtar station.

Station	Objective Function (OF)	OF Values	OF Max	OF Min	OF Mean	Evaluation Criteria		
						NSE	NSE	NSE
Ppl-e Dokhtar	NSE	0.67	146.00	0.92	28.52	---	0.68	0.82
	R <sup>2</sup>	0.72	170.40	0.75	33.25	0.61	---	0.81
	KGE	0.82	172.80	0.84	30.44	0.63	0.68	---

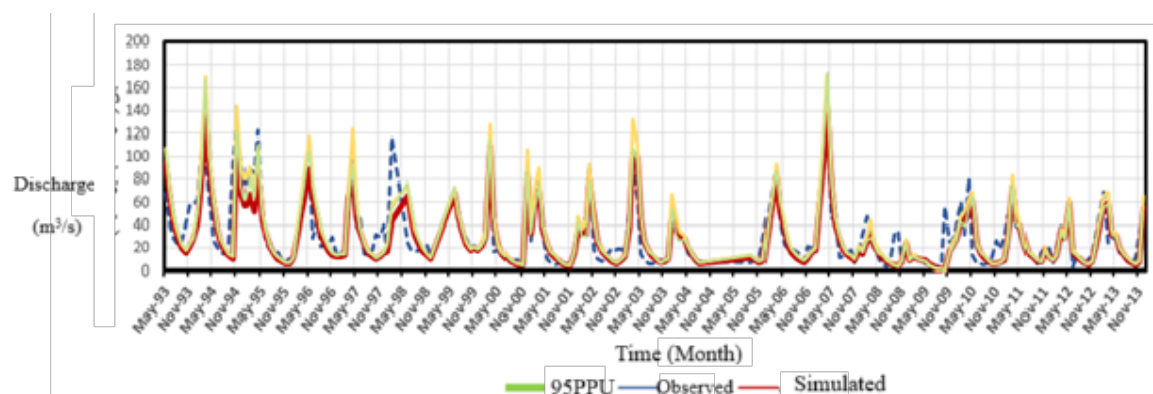


Fig. 11 Comparison of observed and simulated runoff using PSO method at Pldokhtar station.

شکل ۱۱ مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده‌ها در روش PSO در ایستگاه پل دختر.

قورباغستان بیشترین داده‌های مشاهداتی و بالاترین ضخامت باند عدم قطعیت مشاهده شد؛ درحالی‌که در ایستگاه دوآب ویسیان کمترین ضخامت باند و درصد داده‌های اندازه‌گیری‌شده به‌دست آمد. بهترین نتیجه از تابع

#### ۴- نتیجه‌گیری

در استفاده از روش PSO با توابع هدف مختلف جهت واسنجی مدل SWAT و شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه

۰/۸۱ به دست آمده است که با توجه به تحقیقات لئو و همکاران (۲۰۰۳) و گوپتا و همکاران (۲۰۰۹)، بهترین نتایج در این مطالعه می‌باشند.

هدف نش-ساتکلیف در ایستگاه سیمره با ۰/۶۶ است مبین شبیه‌سازی انجام شده در بازه نتایج خوب قرار دارد و در همین ایستگاه در توابع هدف  $R^2$  و KGE به ترتیب ۰/۶۸ و

## 5- List of Signs

$SW_t$	The final amount of water in the soil
$SW_0$	Initial amount of water in the soil
$R_{day}$	Amount of precipitation
$Q_{surf}$	Amount of surface runoff
$E_a$	Amount of evapotranspiration
$W_{seep}$	The amount of water that enters the unsaturated zone from the soil profile.
$Q_{gw}$	Return flow rate
b	Channel width
T	Upper width of the channel
Z	Slope of the sides
d	Channel depth
Pbest	The best experience every particle
Gbest	The best total particle experience
$c_1$	Cognitive learning coefficients
$c_2$	Social learning coefficients
$w_{max}$	Minimum inertia weighting factor
$w_{min}$	Maximum inertia weighting factor
N	Particle population number
D	Number of repetitions
X	Particle vector
V	Particle velocity vector
$r_1, r_2$	Random numbers between 0 and 1
$R^2$	Coefficient of determination
NSE	Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
KGE	Kling-Gupta efficiency coefficient
$\bar{Q}_m$	Average simulated values
$\bar{Q}_s$	Average of observed values
$Q_{mi}$	Simulated value for the i-th point
$Q_{si}$	Observation value for the i-th point
$\sigma_s$	Standard deviation of simulated values
$\sigma_o$	Standard deviation of observations
r	Correlation coefficient

## Acknowledgments

The authors thank the Khuzestan Regional Water Organization for providing information on this research.

## Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.S., M.R.M., and A.M.; methodology, M.S., M.R.M., and A.M.; software, M.S., and A.M. data analysis, M.S., M.R.M., and A.M.; writing—original draft preparation, M.S.; writing—review and editing, M.R.M., and A.M.; supervision, M.R.M., and A.M.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Funding

This work was not financially supported by any organ

## Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this article. The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request. No additional data are available beyond what is presented in the manuscript.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Yuan, L., Sinshaw, T., and Forshay, K. J. J. G. (2020). Review of watershedscale water quality and non-point source pollution models. *Geosciences* 10, 25. doi: [10.3390/geosciences10010025](https://doi.org/10.3390/geosciences10010025).
- Fard, M. D., and Sarjoughian, H. S. (2021). A RESTful framework design for componentizing the water evaluation and planning (WEAP) system. *Simulat. Modell. Pract. Theory* 106, 102199. doi: [10.1016/j.simpat.2020.102199](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102199).
- Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro, M., Franco, N. G., Díaz-Pereira, E., et al. (2020). Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in Mediterranean rainfed agroecosystems. *Catena* 187, 104352. doi: [10.1016/j.catena.2019.104352](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104352).
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., and Kato, T. J. W. (2021). A review of SWAT model application in Africa. *Water* 13, 1313. doi: [10.3390/w13091313](https://doi.org/10.3390/w13091313).
- Crochemore, L., et al. (2015). Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal*, 60 (3), 402–423. doi: [10.1080/02626667.2014.903331](https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903331).
- Krause, P., Boyle, D.P., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. doi: [10.5194/adgeo-5-89-2005](https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005).
- Peel, M.C. and Blöschl, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world. *Progress in Physical Geography*, 35(2), pp.249-261. <https://doi.org/10.1177/0309133311402550>.
- Misgana, M.K. (2012). Model Performance Sensitivity to Objective Function during Automated Calibrations. *J. Hydrol. Eng.* 17, 756–

767. doi: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000497](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000497).
- Green, I.R.A., Stephenson, D. (1986). Criteria for comparison of single event models. *Hydrological Sciences Journal* 31(3), 395-411. <https://doi.org/10.1080/02626668609491056>.
- Dawson, C.W., Abrahart, R.J., See, L.M. (2007). HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling & Software* 22, 1034-1052. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.008>.
- Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40, 1-20. doi: [10.1016/j.envsoft.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011).
- Legates, D.R., McCabe, Jr. G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Researches* 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.
- Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5, 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp. 282-290 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Guinot, V., Cappelaere, B., Delenne, C., Ruelland, D. (2011). Towards improved criteria for hydrological model calibration: theoretical analysis of distance- and weak form-based functions. *Journal of Hydrology* 401, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.004>.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, Le N., Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations, *Journal of Hydrology* 420-421, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.055>.
- Prochnow, S.J., White, J.D., Scott, T., Filstrup, C.D. (2008). Multi-scenario simulation analysis in prioritizing management options for an impacted watershed system. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 8, 3-15. <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0001-4>.
- Kuma, H.G., Feyessa, F.F., Demissie, T.A. (2023). Assessing the impacts of land use/land cover changes on hydrological processes in Southern Ethiopia: the SWAT model approach. *Cogent Eng.* 10, 2199508 <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2199508>.
- Meng, Y., Zhou, L., He, S., Lu, C., Wu, G., Ye, W., Ji, P. (2018). A heavy metal module coupled with the SWAT model and its preliminary application in a mine-impacted watershed in China. *Sci. Total Environ.* 613, 1207-1219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.179>.
- Nedkov, S., Campagne, S., Borisova, B., Krpec, P., Prodanova, H., Kokkoris, I.P., Hristova, D., Le Clec'h, S., Santos-Martin, F., Burkhard, B. (2022). Modeling water regulation ecosystem services: a review in the context of ecosystem accounting. *Ecosyst. Serv.* 56, 101458 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114000>.
- Uniyal, B., Jha, M.K., Verma, A.K. (2015). Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model. *Water Resour. Manag.* 29, 4767-4785. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1089-5>.
- Mandal, U., Sena, D.R., Dhar, A., Panda, S.N., Adhikary, P.P., Mishra, P.K. (2021). Assessment of climate change and its impact on hydrological regimes and biomass yield of a tropical river basin. *Ecol. Indic.* 126, 107646 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107646>.
- dos Santos, F.M., de Souza Pelinson, N., de Oliveira, R.P., Di Lollo, J.A. (2023). Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *Catena* 222, 106872. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106872>.
- Yuan, Y., Koropecjy-Cox, L. (2022). SWAT model application for evaluating agricultural conservation practice effectiveness in reducing phosphorous loss from the Western Lake Erie Basin. *J. Environ. Manag.* 302, 114000 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114000>.
- Liu, W., Wu, J., Xu, F., Mu, D., Zhang, P. (2024). Modeling the effects of land use/land cover changes on river runoff using SWAT models: a case study of the Danjiang River source area, China. *Environ. Res.* 242, 117810 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117810>.
- Bhanja, S.N., Wang, J., Bol, R. (2022). Soil CO2 emission largely dominates the total ecosystem CO2 emission at Canadian Boreal. *Forest* 10. <https://doi.org/10.3389/fevs.2022.898199>.
- Melaku, N.D., Wang, J., Meshesha, T.W. (2020). Improving hydrologic model to predict the effect of snowpack and soil temperature on carbon dioxide emission in the cold region peatlands. *J. Hydrol.* 587, 124939. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124939>.
- Akbari, F., Shourian, M., and Moridi, A. (2022). Assessment of the climate change impacts on the watershed-scale optimal crop pattern using a

- surfacegroundwater interaction hydro-agronomic model. *Agri. Water Manag.* 265, 107508. doi: [10.1016/j.agwat.2022.107508](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107508)
- Gasirabo A, Xi C, Kurban A, Liu T, Baligira HR, Umuhoza J, Umugwaneza A. and Dufatanye Edovia U. (2023). SWAT model calibration for hydrological modeling using concurrent methods, a case of the Nile Nyabarongo River basin in Rwanda. *Front. Water* 5:1268593. doi: [10.3389/frwa.2023.1268593](https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1268593)
- Masih, I., Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Smakhtin, V. (2011). Impact of upstream changes in rain-fed agriculture on downstream flow in a semi-arid basin. *Agricultural Water Management*, 100(1), 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.013>.
- Arnold, JG., Srinivasan P., Muttiah RS., Williams JR. (1998). Large areahydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 73–89. doi: [10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961).
- Safavi, M. (2021). Determining an Effective Calibration Method for Estimating Runoff Using SWAT (Case Study: Karkheh Basin), M.Sc. Thesis, University of Zabol, Zabol, 178p.
- Geza, M., & McCray, J. E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of environmental management*, 88(3), 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.016>.
- Van Liew, M. W., J. G. Arnold, and J. D. Garbrecht. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6):1539-1551. doi: [10.13031/2013.15643](https://doi.org/10.13031/2013.15643).
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.00>