



Investigating Changes in Water Balance Components Using the SWAT+ Model and Determining the Role of Factors Affecting Them

Ramin Hadi Qoraqi¹ | Majid Delavar²

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: ramin.hadi@modares.ac.ir
2. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: m.delavar@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 24 April 2023
Received in revised form
11 June 2023
Accepted 10 January 2024
Published online 17 January 2024

Keywords:

Evapotranspiration
sustainable management
SWAT+ model
Tashk Bakhtegan basin
water resource

ABSTRACT

Detailed water resource balance reports are very important in promoting sustainable watershed management programs. The main purpose of this study is to evaluate and use the SWAT+ model as a new version of the SWAT model in simulating hydrological processes and determining the role of effective factors in the changes of water balance components in Tashk Bakhtegan basin. In this regard, after preparing the required information and entering them into the SWAT+ model, the steps of calibration and validation of the model for river flow in 10 hydrometric stations, base flow in three upstream stations, as well as calibration of the underground water level, evapotranspiration and yield of major cultivated crops was done at the basin level during the period (1980-2014). The evaluation of the model calibration results in most of the stations shows the index values of ($R^2 > 0.5$) and ($NSE > 0.2$) that the results were favorable and acceptable. Comparing the results of the water balance obtained from SWAT+ with the results of other studies shows that the final values of the evaporation-transpiration parameter were higher and the surface currents were lower than the results of other researches, so that only compared to the results of the SWAT model, the three mentioned components increased by 17.0, 1.13 and showed a decrease of 0.06 billion cubic meters per year. Examining the spatial and temporal changes of the balance components also showed that the changes in precipitation and evapotranspiration decrease from north to south of the basin, and in areas with high rainfall, their fluctuations are more proportionate and congruent. The most important factor in the decrease of water flow (74.7 percent) and the increase of evaporation-transpiration (80.3 percent) of the basin is related to non-climatic and human factors such as land use change, construction of dams, etc. and the effect of climatic factors on water flow changes and evaporation-transpiration is 25.3 percent and 19.7 percent respectively. Evaluation of SWAT+ model calibration results and comparison of its results with other studies conducted in the basin indicate the acceptable performance of this model in simulating and separating the contribution of different climatic and human factors in the hydrological conditions of the studied basin. Therefore, according to the new capabilities of this model and the improvement of the simulation processes of underground water and its exchange with the river compared to the SWAT model, it is recommended to use this model in order to estimate and verify the water balance components of basins.

Cite this article: Hadi Qoraqi, R., & Delavar, M. (2024). Investigating Changes in Water Balance Components Using the SWAT+ Model and Determining the Role of Factors Affecting Them. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 1071-1092. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358050.1066>





بررسی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل SWAT+ و تعیین نقش عوامل مؤثر بر آن‌ها

رامین هادی قورقی^۱ | مجید دلاور^۲^۱ گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: ramin.hadi@modares.ac.ir^۲ نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: m.delavar@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

گزارش‌های دقیق بیلان منابع آب اهمیت زیادی در ارتقای برنامه‌های مدیریت پایدار حوضه‌های آبریز دارد. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی و استفاده از مدل SWAT+، به‌عنوان نسخه جدید مدل SWAT در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و تعیین نقش عوامل مؤثر در تغییرات مؤلفه‌های بیلان آبی در حوضه آبریز طشک بختگان است. در این راستا بعد از تهیه اطلاعات موردنیاز و واردکردن آن‌ها به مدل SWAT+ مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای جریان رودخانه‌ها در ۱۰ ایستگاه هیدرومتری، جریان پایه در سه ایستگاه بالادستی و هم‌چنین واسنجی تراز آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات عمده کشت‌شده در سطح حوضه در طول بازه زمانی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) انجام شد. ارزیابی نتایج واسنجی مدل در بیش‌تر ایستگاه‌ها مقادیر شاخص $(R^2 > 0.5)$ و $(NSE > 0.2)$ را نشان می‌دهد که نتایج مطلوب و قابل قبول بود. مقایسه نتایج بیلان آب حاصل از SWAT+ با نتایج سایر مطالعات نشان می‌دهد که مقادیر نهایی پارامتر تبخیر-تعرق بیش‌تر و جریان‌ات سطحی کم‌تر از نتایج سایر پژوهش‌ها بود، به‌طوریکه تبخیر-تعرق فقط در مقایسه با نتایج مدل SWAT، سه مؤلفه مذکور به‌ترتیب افزایش ۰/۱۷، ۱/۱۳ و کاهش ۰/۰۶ میلیارد مترمکعب در سال را نشان می‌دادند. بررسی تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌های بیلان نیز نشان داد که تغییرات بارش و تبخیر-تعرق از شمال به جنوب حوضه کاهش یافته است و در مناطق پربارش تناسب و همخوانی نوسانات آن‌ها بیش‌تر است. بیش‌ترین عامل در کاهش مقادیر آبدی (۷۴/۷ درصد) و افزایش تبخیر-تعرق (۸۰/۳ درصد) حوضه مربوط به عوامل غیراقليمی و انسانی از جمله تغییر کاربری اراضی، احداث سد‌ها و ... است و تأثیر عوامل اقلیمی بر تغییرات آبدی و تبخیر-تعرق به‌ترتیب ۲۵/۳ درصد و ۱۹/۷ درصد است. ارزیابی نتایج واسنجی مدل SWAT+ و مقایسه نتایج آن با سایر مطالعات انجام‌شده در حوضه حاکی از عملکرد قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی و تفکیک سهم عوامل مختلف اقلیمی و انسانی در شرایط هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه می‌باشد. لذا با توجه به قابلیت‌های جدید این مدل و اصلاح فرایندهای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی و تبادلات آن با رودخانه نسبت به مدل SWAT، استفاده از این مدل در جهت برآورد و تدقیق مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه‌های آبریز توصیه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها:

تبخیر-تعرق

حوضه طشک بختگان

مدل SWAT+

مدیریت پایدار

منابع آب

استناد: هادی قورقی، رامین و دلاور، مجید (۱۴۰۲). بررسی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل SWAT+ و تعیین نقش عوامل مؤثر بر آن‌ها.نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۴)، ۱۰۷۱-۱۰۹۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.358050.1066>

۱. مقدمه

وضعیت بحرانی آب و رشد نیاز و مصارف آبی در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور، اهمیت مدیریت منابع آب و ضرورت افزایش بهره‌وری آب را در آن‌ها بیش‌تر کرده است. براساس دیدگاه مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب، تحلیل مصارف در چارچوب بیلان آب حوضه می‌تواند منجر به شناسایی پتانسیل‌های کاهش مصرف آب واقعی یا افزایش بهره‌وری شود و در نهایت زمینه را برای تدوین و اتخاذ اقدامات مناسب فراهم کند (Seckler *et al.*, 1999; Delavar *et al.*, 2020). لذا گزارش‌های دقیق بیلان منابع آب مبتنی بر آمار صحیح و به‌هنگام‌سازی آن‌ها موضوعی اساسی در مدیریت پایدار حوضه‌های آبریز است که در نهایت می‌تواند منجر به استفاده بهینه از منابع آب و خاک شود.

درک مناسب و جامع از تأثیرات عوامل اقلیمی و توسعه انسانی بر چرخه هیدرولوژیکی و بیلان منابع آب حوضه‌ها مستلزم استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز هیدرولوژیکی خواهد بود. در هر حال، با توجه به ابعاد و پیچیدگی‌های سیستم‌های منابع آبی در سطح حوضه‌های آبریز دستکاری‌شده، شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی مشکل خواهد بود و نیازمند استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز جامع است. از میان مدل‌هایی (از قبیل WEAP، Mike Basin، VIC، HSPF و SWAT) که قابلیت و توانایی شبیه‌سازی جامع حوضه را دارا هستند، مدل SWAT با داشتن خصوصیتی از جمله قابلیت شبیه‌سازی جامع و توأم مزرعه و حوضه آبریز، دسترسی رایگان، متن‌باز بودن، امکان استفاده در مقیاس‌های مختلف مکانی و هم‌چنین اعمال طیف متنوعی از راه‌کارهای مدیریتی، نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته و پرکاربردترین از میان آن‌ها بوده است (Bailey *et al.*, 2020). از جمله مطالعاتی که در داخل کشور از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و برآورد بیلان در حوضه‌های آبریز استفاده شده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شبیه‌سازی اجزای بیلان آب در کل ایران (Faramarzi *et al.*, 2009)، تأثیرات تغییر کاربری روی بیلان آبی در حوضه طالقان (Hosseini 2010)، شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز رود زرد در استان خوزستان (Ansari *et al.*, 2014)، شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو در استان گلستان (Zare and Talebi, 2016) و مطالعه شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژیک در حوضه آبریز اسکندری در استان اصفهان (Barati *et al.*, 2019) اشاره کرد که در تمامی موارد نتایج رضایت‌بخش بوده است. در سایر نقاط جهان هم مطالعات مختلفی با این مدل صورت گرفته که از آن جمله می‌توان مطالعات، شبیه‌سازی فرایندهای مؤثر بر بیلان آب در حوضه رودخانه تور کشور سوئیس (Abaspoor *et al.*, 2007)، شبیه‌سازی جریان رودخانه نیل در شرایط محدودیت دسترسی به داده (Ndomba and Birhanu, 2008)، شبیه‌سازی رواناب حوضه رودخانه چالیار هندوستان (Thampi *et al.*, 2010) را نام برد که نتایج قابل قبول و دارای عدم قطعیت کم بوده است.

مدل جدید SWAT+ که به‌تازگی ارائه شده است، در تفکیک حوضه و تعاملات سطوح چشم‌انداز و رودخانه قابلیت‌های بیش‌تری را نسبت به SWAT ارائه می‌دهد. انتظار می‌رود با استفاده کامل از این قابلیت‌ها، شبیه‌سازی‌ها در مطالعات آینده بهبود یابد. در مطالعه‌ای که توسط Wagner *et al.* (2022) برای ارزیابی قابلیت‌های مدل SWAT+ در حوضه آبریز دشت Kielstau در شمال آلمان انجام شد، عملکرد دو مدل SWAT+ و SWAT در برآورد مقدار جریان خروجی حوضه و اجزای بیلان آب و توزیع زمانی و مکانی آن‌ها، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو مدل عملکرد بسیار خوبی را در برآورد جریان خروجی حوضه داشتند. نسخه مدل SWAT جریان آب زیرزمینی بیش‌تر و مدل SWAT+ جریان زهکشی و رواناب سطحی بیش‌تری برآورد نمود. Bieger *et al.* (2017) در مطالعه‌ای که انجام دادند، پیشرفت‌های اصلی مدل SWAT+ را معرفی کردند و به‌طور خلاصه کاربرد آن را در حوضه آبخیز رودخانه کوچک (LREW) در گرجستان با مقایسه عملکرد مدل SWAT+ با مدل‌های قبلی SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط Kakarnde *et al.* (2020) در حوضه رودخانه Lam Sioa

شمال شرقی تایلند انجام شد، عملکرد مدل‌های SWAT و SWAT+ برای شبیه‌سازی جریان در این حوضه که اکثراً شالیزار بود، در طول دوره شبیه‌سازی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۷ مورد مقایسه قرار گرفت. مؤلفه‌های شبیه‌سازی شده بیلان آب در سطح حوضه به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بود؛ میزان تبخیر و تعرق در SWAT+ بیش‌تر بود و تغذیه آبخوان نسبت به SWAT کم‌تر محاسبه شد. Van Tol et al. (2021) برای حوضه آبریز ۱۵۷ هکتاری (Weatherly) در آفریقای جنوبی، روش‌های هیدروپدولوژیکی و روش استاندارد پیش‌بینی جریان را برای اندازه‌گیری جریان را در دو سرریز و محتوای آب خاک را در ۱۳ نقطه مختلف، مقایسه کردند. در روش هیدروپدولوژیکی برای بازتاب مسیرهای جریان از طریق مسیریابی دقیق از مدل SWAT+ استفاده شد. نتایج نشان داد ظرفیت مسیریابی SWAT+ که در رویکرد هیدروپدولوژیکی استفاده شد، منجر به نمایش دقیق‌تری از فرایندهای هیدروپدولوژیکی غالب در این حوضه آبریز شد. در پژوهشی دیگر، در حوزه آبریز رودخانه بوسک^۱ میانی با مساحت ۴۷۰ کیلومترمربع در مرکز تگزاس ایالات متحده به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی و فعل و انفعالات آب‌های زیرزمینی و سطحی (SWAT+(MODFLOW) مورد استفاده قرار گرفت و مدل در برابر مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های هیدروپدولوژیکی میدانی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده در هر مورد به‌خوبی مطابقت داشت (Bailey et al., 2020).

با توجه به سوابق مطالعاتی ذکر شده، از جمله مدل‌های مفهومی پرکاربرد در حوزه مدیریت منابع آب مدل SWAT است، اما وجود برخی مشکلات در ساختار کد و همچنین برخی اشکالات در فرایندهای در نظر گرفته شده توسط آن (Dechmi et al. 2012) و نیاز به اصلاح و ارتقای کد آن با توجه به شرایط هر منطقه، از جمله ضعف‌های کاربردی کار با مدل SWAT است که منجر به ارائه نسل جدید مدل پرکاربرد SWAT و با ویژگی‌های کاملاً جدید با نام SWAT+ شد که براساس ادعای توسعه‌دهنده‌های آن به گونه‌ای طراحی شده است که عملکردها و ظرفیت‌های بسیار پیشرفته‌تری را در مباحث چالش‌برانگیز مدل‌سازی حوضه برای فرایندهای هیدروپدولوژیکی و کیفیت آب در اختیار مدل‌سازان قرار می‌دهد. SWAT+ مدلی جدید بوده و به‌کارگیری آن در سطح کشور از اولین مطالعات انجام شده با آن در منطقه است و نتایج آن هم می‌تواند در استفاده از مدل در سایر مطالعات مرتبط در آینده مؤثر واقع شود، لذا در این پژوهش تصمیم به استفاده از مدل جدید SWAT+ به‌عنوان مدل شبیه‌ساز شد تا از ظرفیت‌های آن در تعریف برنامه‌های مدیریتی، ارتباط منطقی اجزای بیلان آبی و اتصال سیستم‌های جریان مدیریت شده به شبکه جریان طبیعی در جهت برآورد مؤلفه‌های بیلان آب حوضه طشک بختگان در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۴، بررسی نقش عوامل انسانی و اقلیمی و همچنین بررسی تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها استفاده شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه طشک-بختگان با مساحت ۲۷۵۲۳ کیلومترمربع در نیمه جنوبی ایران و در استان فارس قرار دارد. بلندترین نقطه آن با ارتفاع حدود ۳۹۰۰ متر از سطح دریا در غرب حوضه و پست‌ترین نقطه آن در حاشیه دریاچه‌های طشک-بختگان به ارتفاع حدود ۱۶۲۳ متر می‌باشد. از نظر آب‌وهوایی، یک منطقه نیمه‌خشک کارستی با متوسط بارندگی سالانه ۳۲۰ میلی‌متر و متوسط دبی رواناب ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه است و تبخیر متوسط سالانه آن از ۱۷۶۳ تا ۲۸۴۹ میلی‌متر متغیر است. شیب نسبی حوضه از شمال غرب به جنوب شرق است. دریاچه‌های طشک بختگان، مقصد همه رودخانه‌های حوضه از جمله کر و سیوند به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه هستند. رودخانه کر از ارتفاعات قارون پلنگی و موسی خانی سرچشمه گرفته و با حرکت در جهت جنوب شرقی وارد سد ملاصدرا شده و سپس با جریان در امتداد شمال غرب به جنوب شرقی و عبور از دشت‌های

احمدآباد و آسپاس وارد دریاچه سد درودزن می‌شود. رودخانه سیوند نیز پس از جریان در دشت‌های قادرآباد و سعادت‌آباد، در محلی به نام پل خان به رودخانه کر می‌پیوندد، در مسیر این رود نیز سد سیوند قرار دارد. رژیم جریان رودخانه کر برفی بارانی بوده و بخش عمده آب آن در جهت آبیاری محصولات کشاورزی مصرف می‌شود، به طوری که بخش پایاب آن در فصل تابستان فاقد جریان آب می‌باشد. رودخانه سیوند نیز در گذشته دارای آب دائم بوده است، اما با بروز خشکسالی‌های چند سال اخیر و احداث سد سیوند در ۱۱ کیلومتری سعادت‌شهر، جریان رودخانه در این محل به صورت فصلی تغییر یافته است. رژیم جریان آب رودخانه در بخش بالادست دریاچه کافت، برفی بارانی اما در بخش پایین دست حوضه دارای رژیم بارانی است. منطقه از اراضی وسیع کشاورزی و آبی تشکیل شده است که هر ساله هزاران تن محصولات استراتژیک هم‌چون گندم در آن‌ها برداشت می‌شود (گزارش به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب، ۱۳۹۲ و اطلاعات مأخوذ از سازمان جهاد کشاورزی استان فارس). حوضه آبریز طشک-بختگان در شکل زیر قابل مشاهده است.

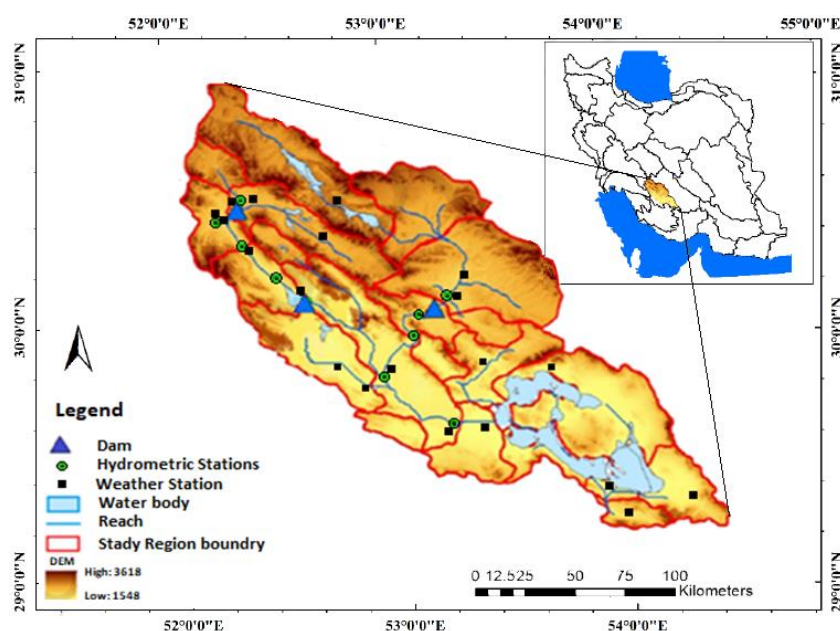


Figure 1. Location of the Tashk-Bakhtegan basin, 22 study regions

۲.۲. مدل SWAT+

SWAT+ یک نسخه کاملاً بازسازی شده از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) بوده و ساختار و سازمان‌دهی کد و فایل‌های ورودی دستخوش تغییرات قابل توجهی شده است. این مدل در دسته مدل‌های مفهومی و نیمه‌توزیعی قرار می‌گیرد که توانایی پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی اقدامات مدیریتی و تغییرات آب‌وهوایی روی کمیت و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های مختلف با شرایط متنوع خاک و پوشش گیاهی را داراست. SWAT+ نمایش مکانی انعطاف‌پذیرتری از فعل و انفعالات و فرایندها، تعریف برنامه‌های مدیریت، مسیریابی اجزا و اتصال سیستم‌های جریان مدیریت شده به شبکه جریان طبیعی درون یک حوضه ارائه می‌دهد (Kakamde et al., 2020). مدل SWAT+ برای شبیه‌سازی حوضه نیاز به طیف متنوعی از اطلاعات دارد. در این پژوهش با توجه به اهداف موردنظر در تهیه مدل شبیه‌ساز، اطلاعات و داده‌هایی از قبیل نقشه‌های رقومی، متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و گیاهی و اطلاعات سازه‌ای و مدیریتی تهیه شده و به مدل معرفی شد. در جدول زیر داده‌ها و نقشه‌های ورودی به مدل و منبع آن‌ها آورده شده است.

Table 1. Data description and sources

Input data	Resolution/Characteristics	Reference
DEM	30 m	Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER GDEM2), http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/
Soil	1 km	Harmonized world soil database ; http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/
Land use	30 m	Iran Water research institute
Climate	26 station	Iranian Meteorological Organization
River discharge	11 stations	Ministry of Energy
Crop yield	Major cropping pattern	Iranian Ministry of Jahade-Agriculture (MOJA)
Agricultural management and Water resources	Planting, harvesting, fertilization-blue water use	Iranian Ministry of Jahade-Agriculture (MOJA) Iran National Water Document (INWD)
Dam characteristic and operation	-	Iran Comprehensive Water Management Plan Iran water management company

SWAT+ در اولین گام مدل سازی در محیط QSWAT+، حوضه را براساس توپوگرافی به چند زیرحوضه تقسیم می کند. بر این اساس با استفاده از نقشه DEM حوضه، مرزهای حوضه ترسیم و ۵۶ زیرحوضه ایجاد شد. سپس نقشه شبکه رودخانه‌ای، موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و سدها جهت تولید اطلاعات فیزیوگرافی و رودخانه‌ها به مدل معرفی شد. هر زیرحوضه نیز به یک یا چند واحد چشم‌انداز تقسیم می شوند. مدل هر واحد چشم‌انداز (LSU)^۲ را معادل هر زیرحوضه و واحدهای مسیریابی را معادل واحدهای چشم‌انداز تعریف کرد. در گام دوم، بعد از هم‌پوشانی لایه رقومی پوشش گیاهی با نقشه خاک FAO و بر هم نهی آن‌ها با نقشه DEM حوضه، HRUهای^۳ اولیه ایجاد شدند. یعنی هر واحد چشم‌انداز، بسته به میزان تنوع خاک، کاربری اراضی و شیب به چند واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم می شوند. سپس به این منظور که شرایط شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی، گیاهی و ... در مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد، کاربری‌های اراضی کشاورزی آبی و دیم به ۱۴ کاربری اراضی کوچک‌تر (کاربری‌های ثانویه) تقسیم شد و کاربری‌های اولیه دیم و آبی حذف شدند. این کار موجب شد که الگوی کشت موجود در حوضه برای هر کدام از زیرحوضه‌ها در مدل اعمال شود. در نتیجه این مرحله، ۲۲۵۷ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در سطح حوضه ایجاد شد. بدین ترتیب از نظر مکانی، کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT+، واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) است. در این مدل نیز همانند نسخه‌های دیگر SWAT برای هر HRU، چرخه هیدرولوژیکی براساس معادله بیلان آب طبق رابطه (۱) شبیه‌سازی می گردد.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، SW_t مقدار آب در خاک در زمان t ، SW_0 مقدار اولیه آب در خاک، R_{day} ، Q_{sur} ، E_a ، W_{seep} و Q_{gw} ، به ترتیب عبارتند از مقدار بارندگی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، آب نفوذیافته به لایه آب غیراشباع و آب برگشتی از آب‌های زیرزمینی در زمان t .

شکل (۲) چرخه کلی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT+ و نحوه ارتباط بین اجزای مکانی مختلف آن را نشان می‌دهد.

در گام سوم مدل‌سازی، ابتدا آمار و اطلاعات روزانه (بارش، دمای حداکثر و حداقل) و اطلاعات مربوط به میانگین بلندمدت پارامترهای تابش آفتاب، رطوبت نسبی و سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی متعلق به سازمان هواشناسی کشور و همچنین اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی وزارت نیرو جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفتند. پس از جمع‌بندی‌های نهایی، اطلاعات مربوط به ۲۴ ایستگاه هواشناسی (به شکل (۱) مراجعه شود) با توجه به طول دوره آماری مناسب و وجود خلأهای کم در سری زمانی آن‌ها به مدل معرفی گردید. همچنین اطلاعات فیزیکی و هیدرولوژیکی مربوط به سه سد موجود در حوضه تهیه شده و اطلاعات بهره‌برداری آن‌ها در قالب جداول تصمیم به مدل وارد شد. در جدول زیر به مشخصات کلی سدهای موجود در سطح حوضه اشاره شده است.

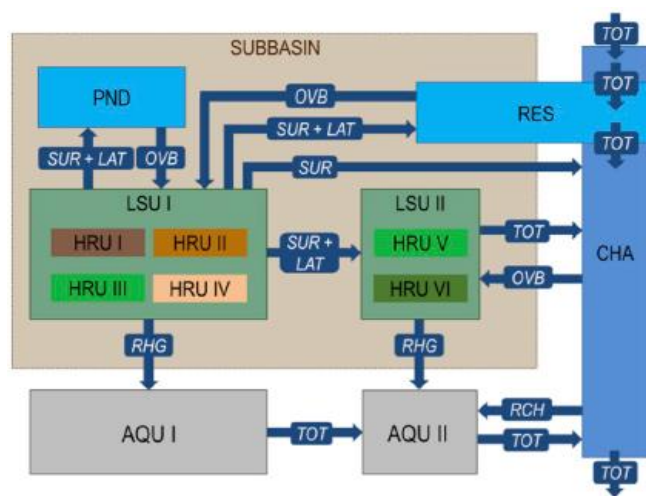


Figure 2. Hydrological cycle between the spatial components of SWAT+ (Bailey et al., 2020)

Table 2. Information on operated dams in the Task Bakhtegan basin

Dam	Location		Operation date	Volume (MCM)
	Lon	Lat		
Dorodzan	52° 25' 06"	30° 12' 20"	1351	993
Molasadra	52° 04' 55"	52° 04' 55"	1386	440
Sivand	30° 08' 23"	53° 05' 01"	1388	150

در ادامه، شرایط مدیریتی هر کشت اعم از زمان بندی کاشت، آبیاری، کوددهی و برداشت محصول و همچنین راندمان آبیاری و منبع تأمین آب آبیاری در قالب برنامه‌های خودکار به مدل معرفی گردید. به منظور انجام شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف بیلان آبی، مدل SWAT+ دارای زیربرنامه‌های مختلفی مانند ذوب برف، رطوبت خاک، ذخیره برگابی و چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی کم عمق و عمیق و ذخیره مخازن سطحی می‌باشد که نسبت به SWAT تغییرات عمده‌ای را در بخش جریانات سطحی داشته است، به این صورت که SWAT+ حجم و دبی رواناب سطحی برای هر HRU را به طور مستقل محاسبه نموده و با استفاده از واحدهای روندیابی، رواناب سطحی را با جریان پایه و جریان جانبی در سطح HRUهای مختلف در هر واحد چشم‌انداز (LSU) تجمیع کرده و سپس از طریق شبکه رودخانه‌ای و با هدایت جریانات تجمیع شده واحدهای چشم‌انداز از بالادست تا پایین دست، مقدار کل آبدهی حوضه را برآورد می‌کند (مطالب ذکر شده از کتابچه راهنمای SWAT+ برگرفته شده است). در نهایت با توجه به دوره دسترسی به داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۴ به عنوان دوره شبیه‌سازی، مدل اجرا شد. در جدول (۳) اطلاعات و مشخصات محصولات غالب کشت شده در سطح حوضه نشان داده شده است.

۳.۲. واسنجی مدل SWAT+

مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی لازم است که یک فرایند موفق واسنجی را به همراه آنالیزهای حساسیت و عدم قطعیت طی کنند تا بتوان از آن‌ها به عنوان ابزاری برای تصمیم‌سازی در مدیریت حوضه‌های آبریز و بررسی سناریوها استفاده کرد (Faramarzi et al., 2009). مدل SWAT+ نیز هم‌چون سایر مدل‌های هیدرولوژیکی نیاز به کالیبراسیون و اعتبارسنجی دارد، کالیبره کردن منجر به نزدیکی هر چه بیشتر داده‌های خروجی مدل و اطلاعات مشاهداتی و در نهایت افزایش دقت شبیه‌سازی و حاصل شدن اطمینان از صحت داده‌های خروجی می‌شود. به طور کلی واسنجی یا کالیبراسیون مدل SWAT+

را می‌توان با دو روش کالیبره دستی و خودکار انجام داد. در حال حاضر چند نرم‌افزار (SWAT CUP+، IPEAT+، SWATPlusR و SWAT+Toolbox) قابلیت انجام فرایند کالیبراسیون این مدل را دارند که در این پژوهش تصمیم گرفته شد از SWAT+Toolbox به‌عنوان نرم‌افزار کالیبراسیون استفاده شود. در ابتدای مرحله کالیبراسیون، برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی جریان و انتخاب بهینه پارامترهای واسنجی، لازم است که تحلیل حساسیتی برای پارامترهای کالیبراسیون انجام شود. در این مطالعه از طریق نرم‌افزار SWAT+Toolbox و روش Random Balance Designs Fourier Amplitude، آنالیز حساسیت مدل انجام شد و پارامترهایی که تأثیر بیش‌تری بر خروجی‌های مدل از جمله جریان رودخانه و دبی پایه داشتند، مشخص شدند. این مدل در پایان آنالیز، به هرکدام از پارامترهای تعیین‌شده ضریب حساسیتی اختصاص می‌دهد که هرچقدر مطلق آن بزرگ‌تر باشد، میزان حساسیت به آن پارامتر و اثرگذاری آن بیش‌تر است. در جدول پایین، نتایج آنالیز حساسیت به‌صورت رتبه‌بندی‌شده نشان داده شده است.

Table 3. Cropping pattern and filed management information in the Task Bakhtegan basin

Type	Plant	Date of planting	Date of harvesting	Area	Type of fertilizer			Water requirement	Yield (ton/ha)
					N	P	M		
Irrigated farming	Apple	-	Nov	2.1	200	150	25000	880	3.4-25
	Plum	-	June-oct	1	200	150	25000	744	4.5-25
	Almonds	-	oct	4.2	200	200	-	1022	0.2-2.5
	Fig	-	Aug-oct	0.1	200	200	-	300	0.8-4
	Olive	-	Nov	5.4	250	200	20000	1266	0.6-16
	Wheat	Oct	June	49.2	200	100	25000	476	1-5.8
	Barley	Oct	June	4.4	200	100	25000	410	0.4-4.5
	Sunflower	June	Oct	6.3	70	45	28000	577	1-8.8
	canola	May	Nov	1.8	100	100	-	916	1.4-4.2
	Beet	April	Oct	3.4	170	260	1900	1168	3.2-44.1
	Tomato	May	Sep	2.6	80	100	10000	772	6-70
	Potato	April	Oct	0.9	150	100	-	853	16-36
	Onions	April	Sep	0.5	100	80	30000	861	7-89
	Alfalfa	April	May-oct	3.3	100	100	21000	1123	4-66
	Beans	May	Sep	8.2	100	150	10000	729	1-2.5
Rice	June	Oct	6.3	205	2.5	-	772	3-5	
Dry farming	Peas	April	August	6.2	-	18	-	-	0.3-0.5
	Barley	Oct	June	5.9	200	100	25000	-	0.4-4.5
	Wheat	Oct	June	13.2	200	100	25000	-	1-5.8
	Almond	-	Oct	20.4	200	200	-	-	0.2-3.5
	Fig	-	Aug-oct	34.9	200	200	-	-	0.8-4
	grape	-	dec	19.3	-	-	25000	-	1-4.2

Table 4. Results of model sensitivity analysis

Row	Name	Group	Description	Sensitivity
1	cn2	hru	شماره منحنی رواناب	0.886589
2	bd	sol	چگالی توده رطوبتی	0.768848
3	esco	hru	ضریب جبران تبخیر خاک	0.723245
4	z	sol	عمق پروفیل خاک	0.635962
5	perco	hru	ضریب نفوذ	0.632458
6	epco	hru	ضریب جبران جذب آب گیاه	0.562356
7	alpha	gw	ثابت فروکش جریان پایه	0.433562
8	awc	sol	ظرفیت نگهداری رطوبت خاک	0.405967
9	lat_ttime	hru	زمان انتقال جریان جانبی	0.372659
10	sp_yld	gw	آبدهی ویژه آب‌های زیرزمینی کم عمق	0.232896
11	k	sol	ضریب هدایت هیدرولیکی خاک	0.226122
12	revap_min	gw	حداقل موجودی آبخوان کم عمق برای شکل‌گیری تبخیر از آن	0.105321
13	flo_min	gw	عمق آستانه موردنیاز آب در آبخوان کم عمق برای جریان بازگشتی	0.100121
14	cn3_swf	hru	ضریب رطوبتی خاک	0.033034
15	chk	rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر	0.011125
16	revap_co	gw	ضریب تبخیر از آب زیرزمینی	0.008461
17	chn	rte	ضریب مانینگ برای کانال اصلی	0.002634
18	bf_max	gw	نرخ جریان پایه زمانی که کل منطقه به جریان پایه کمک می‌کند	0.001089
19	canmax	hru	ضریب برگاب	0.001012

بعد از مشخص شدن پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی در مرحله آنالیز حساسیت، با توجه به داده‌های مشاهده‌ای، مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌صورت ماهانه انجام شد. شکل شماتیک مراحل واسنجی مدل در شکل (۳) قابل مشاهده است.

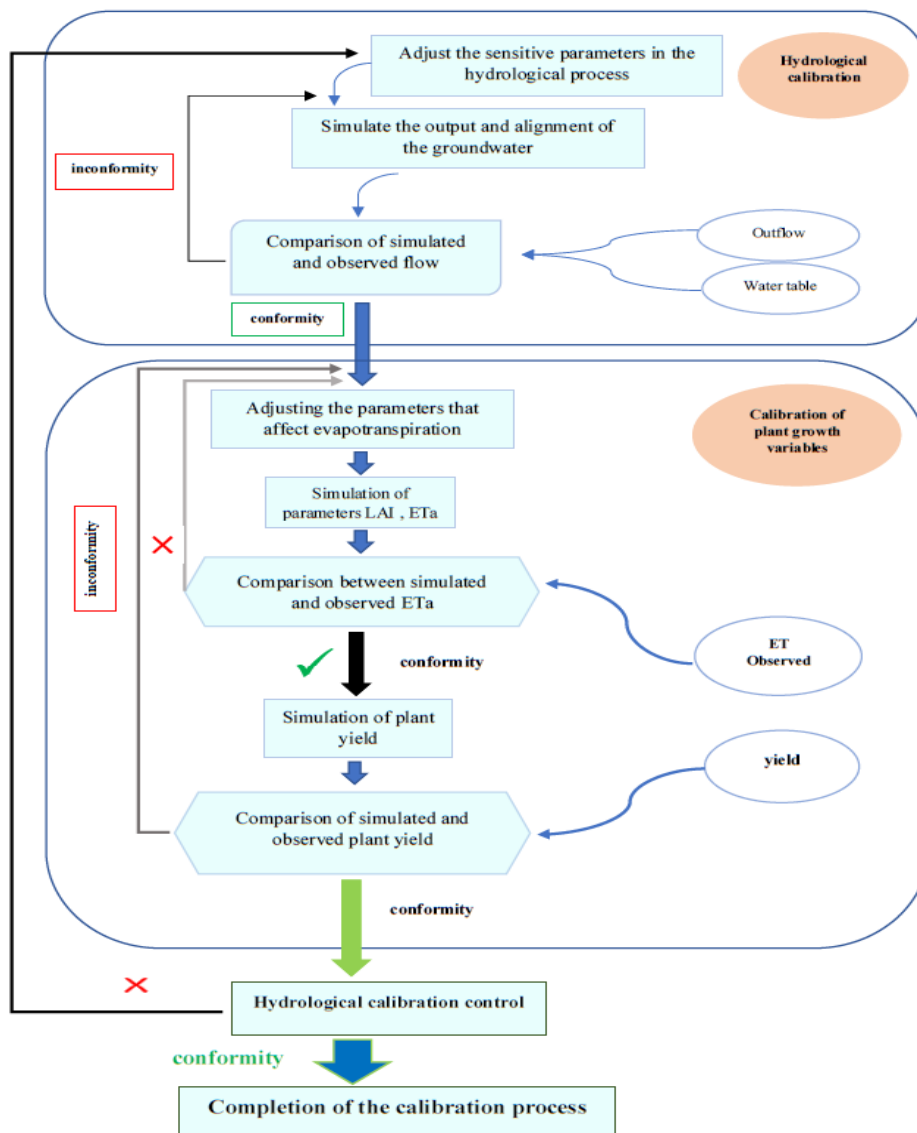


Figure 3. SWAT+ Model Calibration Process Framework

سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۱ به‌عنوان دوره گرم‌کردن^۴، بازه زمانی ۱۹۸۲-۲۰۰۰ به‌عنوان دوره واسنجی مدل و ۲۰۰۱-۲۰۱۴ نیز برای دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. در گام ابتدایی به‌منظور اطمینان از عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان‌ات سطحی و آب زیرزمینی و اندرکنش آن‌ها، واسنجی مدل با استفاده از داده‌های دبی جریان و تراز آب زیرزمینی ماهانه انجام گرفت. برای واسنجی جریان، از داده‌های مشاهده‌ای ۱۰ ایستگاه هیدرومتری در سطح حوضه استفاده شد (به شکل (۱) مراجعه شود). در این راستا با استفاده از تابع هدف Dynamically Dimensioned Search (DDS) در روش کالیبره

خودکار در نرم‌افزار SWAT+Toolbox اقدام به واسنجی مدل در ایستگاه‌های بالادستی شد. سپس به منظور افزایش دقت واسنجی، مقادیر پارامترها در روش کالیبره دستی تغییر داده شد و در هر بار اجرا با توجه به شاخص‌ها و معیارهای آماری، نتایج مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از بهینه‌سازی پارامترها در ایستگاه‌های بالادستی، مقادیر بهینه پارامترها در زیرحوضه‌های میانی و سپس پایین‌دستی اعمال شد و در صورت نیاز تغییراتی انجام شد تا نتایج ارزیابی‌ها بهینه شود. در مرحله بعد با توجه به اهمیت تبادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی در فرایند شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها و شکل‌گیری جریان پایه، میزان انطباق داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی دبی پایه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، با استفاده از نرم‌افزار Hydro office، زیربرنامه BFI+ و روش RDF_Champman Algorithm در دوره زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۴، دبی پایه جریانات شبیه‌سازی شده و مشاهداتی سه ایستگاه بالادستی که تحت تأثیر جریان کنترلی نمی‌باشند، جداسازی شد. هم‌زمان با واسنجی جریان رودخانه‌های حوضه، واسنجی مدل به منظور برآورد مناسب تغییرات سالانه تراز آب زیر زمینی نیز انجام گرفت و نتایج با استفاده از شاخص‌های R2 و NSE مورد بررسی قرار گرفت. شاخص همبستگی (R2) در محدوده (صفر تا یک) قرار دارد و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است. بازه تغییرات شاخص NSE بین یک تا منفی بینهایت و مقدار بهینه آن یک است. شاخص RMSE نیز در محدوده صفر تا مثبت بی‌نهایت تغییر می‌کند و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. در نهایت نیز واسنجی مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی با استفاده از پارامترهای مؤثر بر رشد گیاهی (پارامترهای رشد گیاهی در فایل plants.dat موجود است) انجام شد، اما با توجه به کمبود داده‌های لایسیمتری در منطقه، مقادیر تبخیر و تعرق گزارش شده از سند ملی آب در سطح حوضه (در شکل ۶) مقادیر ذکر شده است)، با مقادیر متوسط تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده توسط مدل SWAT+ مقایسه و مبنای واسنجی مدل قرار گرفت. بعد از مرحله واسنجی مدل، به اعتبارسنجی مدل پرداخته شد. در این مرحله که در طول بازه زمانی ۲۰۰۱-۲۰۱۴ انجام شد، با استفاده از مقادیر بهینه‌شده پارامترها در مرحله کالیبراسیون، مدل اجرا شد و نتایج خروجی با همان معیار و شاخص‌های مرحله قبلی سنجیده شد.

۲.۴. بررسی اثرات اقدامات انسانی و اقلیمی بر مؤلفه‌های بیلان منابع آب

با توجه به اهمیت دو متغیر اساسی بارش و دما در شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، در این پژوهش حساسیت مؤلفه‌های مختلف هیدرولوژیکی حوضه نسبت به تغییرات دما و بارش براساس رویکرد پیشنهادی Vano and Lettenmaier (2014) و با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه گردید:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{Hist+\Delta P} - V_{Hist}}{V_{Hist} \Delta P} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$S_V = \frac{V_{Hist+\Delta T} - V_{Hist}}{V_{Hist} \Delta T} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این روابط، ε_V و S_V حساسیت مؤلفه مورد نظر به ترتیب نسبت به تغییرات بارش و دما می‌باشند و ΔP درصد تغییرات بارش نسبت به شرایط تاریخی، ΔT تغییر دما نسبت به شرایط تاریخی، V_{Hist} مقدار متوسط بلندمدت سالانه مؤلفه مورد نظر در شرایط تاریخی، $V_{Hist+\Delta P}$ مقدار متوسط بلندمدت سالانه مؤلفه مورد نظر در شرایط تغییر ΔP درصدی بارش نسبت به شرایط تاریخی و $V_{Hist+\Delta T}$ مقدار متوسط بلندمدت سالانه مؤلفه مورد نظر در شرایط تغییر دمایی ΔT درجه‌ای نسبت به شرایط تاریخی می‌باشند. ε نشان‌دهنده درصد تغییر در متوسط بلندمدت سالانه مؤلفه مورد نظر به ازای یک درصد تغییر در بارش متوسط بلندمدت سالانه حوضه می‌باشد، درحالی‌که S بیانگر درصد تغییر در متوسط بلندمدت سالانه مؤلفه مورد نظر به ازای یک درصد تغییر در متوسط بلندمدت دمای سالانه حوضه است.

شاخص‌های S و ε در این روش بر مبنای تغییر در مقادیر بلندمدت شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی محاسبه می‌شوند. لذا استفاده از آن برای داده‌های با طول دوره آماری کوتاه می‌تواند خطاهایی را به همراه داشته باشد. در نهایت، مقدار تغییر در مؤلفه هیدرولوژیکی موردنظر در اثر عوامل اقلیمی و انسانی با استفاده از رابطه زیر قابل برآورد می‌باشد (Vano *et al.*, 2012):

$$c = \varepsilon_v \Delta P + \Delta V \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$S_v \Delta T$$

$$\Delta V_H = \Delta V_{obs} - \Delta V_C \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\Delta V_C$$

که در آن، ΔV_C و ΔV_H درصد تغییر در مؤلفه موردنظر تحت تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی است، ΔV_{obs} کل تغییرات مشاهده شده در مؤلفه موردنظر می‌باشد.

روند کلی کار در این روش به این صورت است که با تغییرات پارامترهای دما (تغییرات درجه‌ای اعمال می‌شود) و بارش (تغییرات درصدی اعمال می‌شود)، در طول بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ میزان تغییرات در مقادیر مؤلفه‌های رواناب سطحی و تبخیر-تعرق برآورد شده حوضه طشک بختگان در بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ توسط مدل SWAT+ محاسبه شده و سپس از طریق روابط (۲) و (۳) حساسیت مؤلفه موردنظر نسبت به تغییرات دما و بارش محاسبه می‌شود و در نهایت با جایگذاری مقادیر به دست آمده در رابطه (۴) و سپس رابطه (۵)، میزان اثرات اقدامات اقلیمی و غیراقلیمی در تغییر مؤلفه‌های ذکر شده به دست می‌آید.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی

نتایج جریان شبیه‌سازی شده مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از شاخص‌های R2 (ضریب تبیین)؛ NSE (نش-سانتلیف) و RMSE (ضریب میانگین مربع خطا) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول (۳) نشان داده شد.

Table 3. The results of calibration and validation of discharge in the hydrometric stations

Station	Subbasin	Period	Calibration			Validation		
			R ²	NSE	RMSE (m ³ /s)	R ²	NSE	RMSE (m ³ /s)
Dehkade Sefid	1	1980-2014	0.53	0.238	2.75	0.51	0.362	2.775
Jamalbag-Shirin	6	1980-2014	0.6	0.293	8.8	0.55	0.32	5.632
Chamriz	12	1980-2014	0.54	0.497	16.95	0.50	0.56	16.12
Abas abad	16	2010-2014	-	-	-	0.57	0.55	12.13
Tang belagi	21	1985-2014	0.73	0.32	4.11	0.6	0.288	4.2
Dourodzan Dam	23	1982-2014	0.41	0.373	20.01	0.35	0.231	19.01
Rahmat abad	26	1991-2014	0.63	0.391	6.21	0.51	0.41	6.27
Dashtbal	31	1980-2014	0.61	0.30	5.0	0.55	0.491	5.53
Pol khan	34	1980-2014	0.45	0.44	30.02	0.44	0.42	23.5
Hasan abad-kharam	43	1997-2014	0.75	0.56	9.87	0.63	0.41	20.156

مقادیر شاخص R² در اکثر ایستگاه‌ها بیش‌تر از ۰/۵ و شاخص NSE بیش‌تر از ۰/۲ است. با توجه به معیارهای ارزیابی دقت واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی براساس شاخص‌های مذکور، معمولاً مقادیر R² بیش‌تر از ۰/۵ قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند و برای شاخص NSE مقادیر مقادیر بین صفر و یک به‌طور کلی به‌عنوان سطوح عملکرد قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند، همچنین برای شاخص RMSE، هرچه مقدار کم‌تر و به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است (Moriassi *et al.*, 2007;)

ایستگاه‌های سد درودزن و پل خان، مقدار همبستگی بیش‌تر از ۰/۵ و نتایج مدل قابل قبول است. برای شاخص NSE فقط در دو ایستگاه چمریز و عباس‌آباد در محدوده رضایت‌بخشی هستند و سایر ایستگاه‌ها نیز قابل قبول هستند. در ایستگاه سد درودزن و ایستگاه پایین دست و تحت تأثیر آن یعنی پل خان به دلیل عدم امکان وارد کردن سری زمانی خروجی سد در مدل SWAT+ و وارد کردن جدول تصمیم^۶ (در این جدول‌ها که برای هر سد به صورت جداگانه براساس شرایط زمانی یا میزان ذخیره آب سد، مقدار خروجی آن تعیین می‌شود) برای ایجاد جریان خروجی در سدها، تطابق خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی کم‌تر شده و در نتیجه مقدار شاخص‌ها نتایج ضعیف‌تری را نشان می‌دهند. براساس شاخص RMSE، در دوره واسنجی در ایستگاه‌های چمریز، سد درودزن و پل خان مقادیر به دست آمده مطلوب نیست و در سایر ایستگاه‌ها نتایج قابل قبول است. اما در دوره صحت‌سنجی در ایستگاه‌های چمریز، عباس‌آباد، سد درودزن، پل خان و خرامه، نتایج ضعیف بوده و در سایر ایستگاه‌ها قابل قبول است. در شکل (۴) سری زمانی ماهانه جریان مشاهداتی به همراه جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT+ در محل ایستگاه هیدرومتری حسن‌آباد-خرامه در ورودی دریاچه طشک بختگان نشان داده شده است.

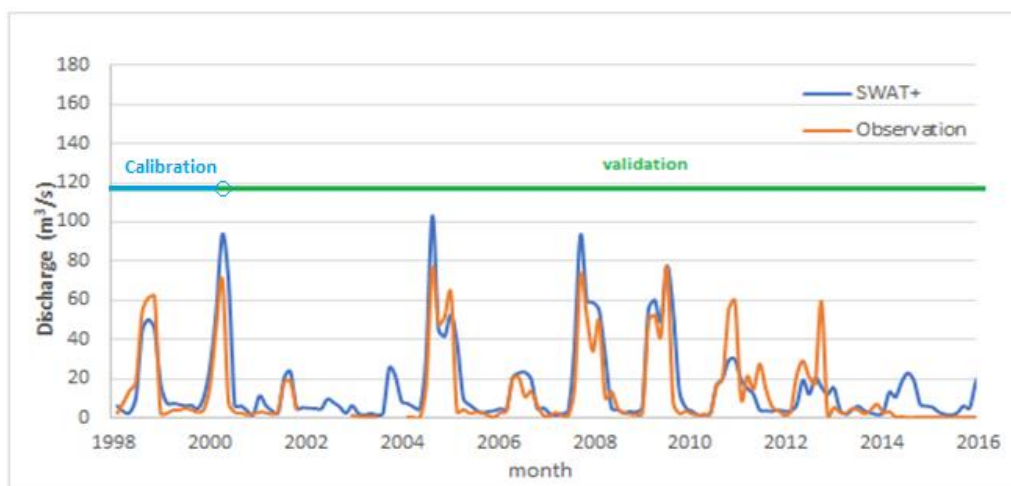


Figure 4. Observed and simulation values of the river flow at Hasan Abad-Kharameh station

۲.۳. نتایج واسنجی دبی پایه

بعد از ارزیابی مقادیر کلی دبی جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل، بررسی دبی پایه به عنوان جریان تقریباً ثابت داخل رودخانه و بخشی مهم از جریان‌ات کلی حوضه که ناشی از تبادلات آب‌های زیرزمینی و سطحی است، اهمیت زیادی دارد. نتایج مربوط به ارزیابی دبی پایه (مشاهداتی و شبیه‌سازی) در ایستگاه‌های ذکر شده با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 و NSE در جدول زیر آورده شده است.

Table 4. Results of evaluation of basic flows

Station	Calibration		Validation	
	R^2	NSE	R^2	NSE
Dehkade Sefid	0.51	0.28	0.53	0.26
Jamalbaig-Shirin	0.63	0.46	0.49	0.37
Tangblagi	0.8	0.6	0.43	0.38

مقایسه دبی پایه جداسازی از داده‌های مشاهداتی و دبی پایه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT+ و ارزیابی آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مقادیر همبستگی در بازه واسنجی در هر سه ایستگاه در محدوده مناسب ۰/۵ به بالا و در بازه اعتبارسنجی در محدوده نزدیک به ۰/۵ است. در بازه واسنجی در ایستگاه تنگ بلاغی برحسب شاخص NSE وضعیت خوب و دو ایستگاه دیگر نزدیک به وضعیت مطلوب هستند، اما در محدوده اعتبارسنجی، مقدار NSE در هر سه ایستگاه در وضعیت قابل قبول است. در کل می‌توان گفت براساس ارزیابی شاخص R^2 ، نتایج مناسب و براساس NSE، نتایج در محدوده قابل قبول قرار دارند.

۲.۳. نتایج واسنجی تراز آب زیرزمینی

در ادامه مراحل واسنجی جامع نتایج مدل SWAT+، به دلیل تأثیری که سفره‌های آب زیرزمینی در تأمین جریانات پایه رودخانه و همچنین تأمین منابع آبی لازم برای آبیاری دارند. لازم است میزان انطباق بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده تغییرات تراز آبخوان‌ها توسط مدل در طول دوره شبیه‌سازی با استفاده از شاخص‌های R^2 و NSE بررسی شود. در شکل زیر نتایج ارزیابی براساس شاخص‌های ذکر شده به صورت تغییرات مکانی آن‌ها در آبخوان‌هایی که طول دوره آماری داده‌های مشاهداتی آن‌ها بیش‌تر و مناسب‌تر بود، آورده شده است.

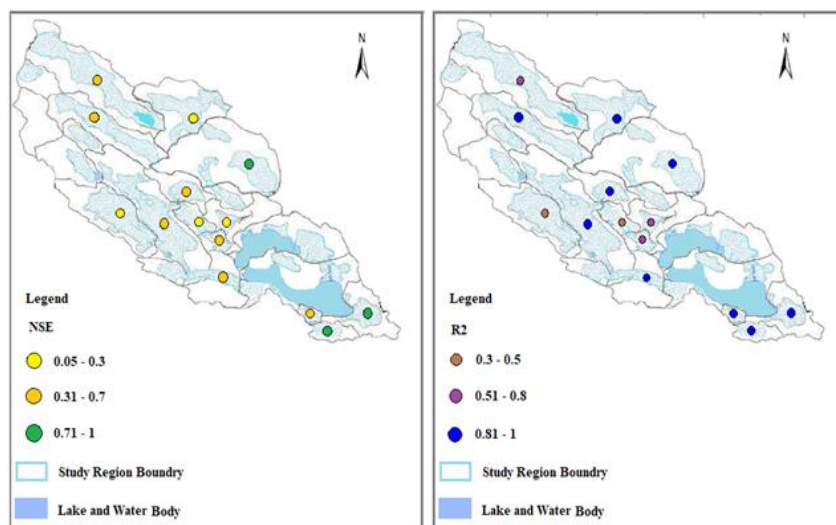


Figure 5. Spatial display of R^2 , NSE indices values between observed and simulated values of changes in the level of aquifers in the study area

نتایج مربوط به بررسی میزان انطباق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تغییرات تراز آبخوان‌ها با استفاده از شاخص‌های R^2 و NSE همان‌گونه که از نقشه تغییرات مکانی آن‌ها مشخص است. مقادیر شاخص R^2 را برای بیش‌تر آبخوان‌ها مقداری بیش‌تر از ۰/۸ نشان می‌دهد، به‌طوربه‌طوری که برای ۶۴ درصد آبخوان‌ها مقدار شاخص بالاتر از ۰/۸ و در ۸۶ درصد آن‌ها بالاتر از ۰/۵ است که عملکرد مدل را براساس این شاخص خوب نشان می‌دهد. اما براساس شاخص NSE در ۵۰ درصد آبخوان‌ها مقدار NSE بیش‌تر از ۰/۵ و در ۷۰ درصد آن‌ها بیش‌تر از ۰/۳ است که حکایت از وضعیت قابل قبول در نتایج مدل دارد. نکته قابل اهمیت در شکل بالا، وجود مقادیر پایین شاخص‌های ارزیابی در محدوده‌های نزدیک به دریاچه (در بالادست) است که می‌تواند ناشی از برداشت‌های زیاد منابع آب زیرزمینی در پایین دست رودخانه

(ورودی به دریاچه) برای مصارف کشاورزی باشد که تأثیرات آن در ایجاد نوسانات در تراز آب زیرزمینی و نتایج ضعیف شبیه‌سازی شده نمایان شده است. اما در مناطق بالادست و سرشاخه رودخانه‌های حوضه به دلیل برداشت‌های کم‌تر از منابع آب آبخوان‌ها، تغییرات تراز آب کم‌تر بوده و نتایج شاخص‌ها مطلوب‌تر از پایین‌دست است. در کل با جمع‌بندی نتایج هر دو شاخص می‌توان گفت که عملکرد مدل در شبیه‌سازی تغییرات تراز آبخوان‌ها، قابل قبول و مطلوب است.

۳.۳. نتایج واسنجی تبخیر و تعرق و عملکرد

نتایج کالیبراسیون تبخیر-تعرق و عملکرد محصولات کشت‌شده در سطح حوضه در قالب شکل‌های (۶-الف و ب) قابل مشاهده است. با مقایسه مقادیر عملکرد و تبخیر-تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT+ و مقادیر گزارش شده توسط سند ملی آب کشور در نمودارهای پایین، می‌توان دریافت که عملکرد مدل خوب بوده و به جز دو کاربری برنج و یونجه که مقدار تبخیر-تعرق شبیه‌سازی شده کم‌تر از مقدار سند ملی است در سایر محصولات مقادیر بسیار نزدیک به هم هستند. اما در بخش عملکرد، در چهار کاربری کلزا، گوجه‌فرهنگی، پیاز و چغندر قند، مدل SWAT+ مقادیر عملکرد را کم‌تر تخمین زده است و در سایر محصولات اختلاف‌ها بسیار کم است. در پژوهش‌های *Abbaspour et al.* (2009) و *Arnold et al.* (2012) و همچنین پژوهشی که توسط *Delavar et al.* (2020) در سطح حوضه طشک بختگان انجام شد نیز نتایج واسنجی تبخیر-تعرق و عملکرد نشان از برآورد عملکرد پایین توسط مدل شبیه‌ساز SWAT برای برخی محصولات داشت که علل آن را می‌توان در چند مورد زیر خلاصه کرد؛ ۱- اختلاف عملکرد محصولات در نقاط مختلف حوضه (با توجه به جدول ۳) ۲- عملکرد هر محصول متأثر از پارامترها و عوامل مختلفی شامل مقدار تبخیر-تعرق گیاه، شاخص‌های رشد گیاهی و منابع مغذی در اختیار گیاه است که تنظیم تمامی این مقادیر در شرایط آب‌وهوایی مختلف، بسیار دشوار است. با توجه به اثرگذاری میزان تأمین آب موردنیاز گیاه بر مقدار تبخیر-تعرق آن، برای این مقایسه، مقادیر متوسط تبخیر-تعرق گیاهان در شرایط آبیاری کامل از مدل استخراج گردید.

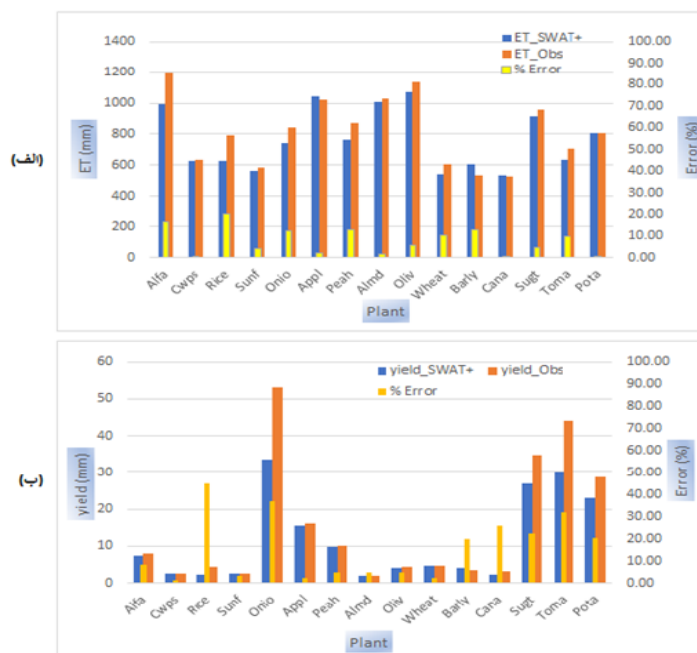


Figure 6. Comparing observed values of (a) ET reported in the national water document and the average ET simulated (b) yield reported in the national water document and the average yield simulated by the SWAT+ model

۴.۳. مقایسه نتایج بیلان منابع آب استخراج شده از مدل SWAT+ با سایر مطالعات

مطالعات بیلان آب به ما اجازه می‌دهند تا چرخه آب را در هر دوره زمانی بررسی کنیم، این کار با روش‌ها و ابزارهای مختلفی انجام می‌شود. اما زمانی کارکرد و ارزش نتایج یک روش یا ابزار مشخص خواهد شد که با نتایج مطالعات مشابه در همان منطقه مقایسه شود. بیلان منابع آب حوضه طشک بختگان به واسطه اهمیتی که دارد، در مطالعات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش، نتایج حاصل از مدل SWAT+ در مقابل نتایج بیلان آب حاصل از شبیه‌سازی SWAT و همچنین نتایج مطالعات اطلس منابع آب حوضه و به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب منطقه قرار داده شده و مقایسه شدند. طول دوره بررسی مؤلفه‌های بیلان آبی در مدل SWAT+ بازه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) انتخاب شدند که علت آن داشتن شرایط یکسان برای مقایسه با نتایج حاصل از مطالعه بیلان آبی حوضه با استفاده از مدل SWAT در قالب "برنامه ملی سازگاری با تغییر اقلیم در بخش آب" است.

در جدول (۵) مؤلفه‌های اصلی بیلان آب حوضه در مطالعات مختلف (با ذکر دوره‌های زمانی آنها) ارائه شده است.

Table 5. Comparison of the estimation results of the water balance components obtained from the SWAT+ model with the SWAT model and water resources balance reports

Variable	Study	SWAT+ model (1985-2014)	SWAT model (1985-2014)	Comprehensive water plan (1967-2011)	Water Resources Atlas (1967-2006)
Precipitation Volume (mcm/yr)		11.08	10.51	9.55	10.01
Actual Evapotranspiration Volume (mcm/yr)		10.1	8.99	5.94	5.37
Basin Outflow (mcm/yr)		0.66	0.72	-	-
Ground water Change (mcm/yr)		-0.23	-0.24	0.00	-0.32

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول، مؤلفه بارش حاصل از مدل SWAT+ در بازه شبیه‌سازی مشابه با مدل‌سازی SWAT افزایش ۰/۱۷ میلیارد مترمکعب در سال را نشان می‌دهد، در مؤلفه‌های تبخیر-تعرق واقعی و جریان خروجی حوضه نیز به ترتیب افزایش ۱۲ و کاهش هشت درصدی ملاحظه می‌گردد. اما در تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، نتایج مدل SWAT کاهش ذخیره ۲۴۰ میلیون مترمکعب را نشان می‌دهد که به مقدار ۱۰ میلیون متر مکعب بیش‌تر از نتایج مدل SWAT+ کاهش داشته است. در این مقایسه به‌خوبی نمایان است که مؤلفه‌های اصلی ورودی (بارش) و خروجی (تبخیر-تعرق) SWAT+، افزایش برآورد دارند و با وجود افزایش مقدار بارش در SWAT+، رواناب یا جریان‌های سطحی نسبت به نتایج SWAT کم‌تر است که دلیل عمده آن افزایش نسبت تبخیر-تعرق به بارش در نتایج SWAT+ است، به‌نحوی که این نسبت در SWAT برابر با ۸۵ درصد و در SWAT+ برابر با ۹۰ درصد است.

در مقایسه با نتایج مطالعات اطلس منابع آب و به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب، مؤلفه بارش به ترتیب ۱/۰۶ و ۱ درصد بیش‌تر و تبخیر-تعرق به مقدار ۴/۷۳ و ۴/۱۶ میلیارد مترمکعب افزایش را نشان می‌دهد، اما در مؤلفه تغییرات آب زیرزمینی به نتایج طرح به‌هنگام‌سازی، کاهش ۲۳۰ میلیون مترمکعبی را نشان می‌دهد و نسبت به نتایج اطلس منابع آب ۹۰ میلیون مترمکعب کم‌تر از مقدار ذخیره آبخوان‌ها کسر شده است. در این بخش از مقایسه نتایج نیز می‌توان نتیجه گرفت عمده اختلافات ناشی از محاسبه بارش و تبخیر-تعرق بیش‌تر و همچنین نسبت تبخیر-تعرق به بارش بیش‌تر در نتایج SWAT+ است (لازم به ذکر است بخشی از اختلافات در مقایسه نتایج با مطالعات اطلس منابع آب و به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب، مربوط به تفاوت در دوره آماری آن‌ها نسبت به دوره شبیه‌سازی مدل حاضر است). در کل در نتایج مدل SWAT+ افزایش مؤلفه‌های بارش، تبخیر-تعرق و جریان خروجی نمایان است که میزان افزایش تبخیر-تعرق، بیش‌تر از سایر مؤلفه‌های بیلان آب است.

۳.۵. بررسی تغییرات مکانی و زمانی مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه

به‌منظور مدیریت منابع آب حوضه‌های آبریز و بررسی امکان انجام طرح‌های عمرانی، کشاورزی و یا بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و سطحی و همچنین پایش خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها، آگاهی از بیلان آب حوضه‌های آبریز مهم و حیاتی است. در این پژوهش، تحلیلی از تغییرات شرایط هیدرولوژیکی حوضه طشک-بختگان با استفاده از مدل SWAT+ صورت گرفت. به این منظور چهار مؤلفه بیلان آبی بارش، تبخیر-تعرق، جریان خروجی از حوضه، تغییرات ذخیره آب زیرزمینی موردبررسی قرار گرفتند. برآورد تغییرات مکانی پارامترهای بارش و تبخیر-تعرق به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی و خروجی به یک چرخه هیدرولوژیکی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. شرایط مکانی و هواشناسی حوضه طشک-بختگان به این صورت است که هرچه از مناطق کوهستانی در شمال حوضه به مناطق پست و جلگه‌ای در جنوب حوضه و یا از سمت غرب به شرق حوضه پیش می‌رویم از مقدار بارش‌ها کاسته می‌شود (گزارش به‌هنگام‌سازی بیلان آب حوضه). با توجه به شکل (۷-ب) که مربوطه به تغییرات مکانی میانگین بارش سالانه در سطح حوضه است، مقدار بارش از ۵۷۰ میلی‌متر در شمال حوضه به ۲۹۰ میلی‌متر در جنوب و در جهت غرب به شرق حوضه نیز مقدار بارش کاهشی بوده و از ۴۹۰ میلی‌متر به ۳۱۰ میلی‌متر حوضه می‌رسد که نشان می‌دهد نتایج خروجی مدل تا حد بالایی متناسب با شرایط هواشناسی منطقه است. با توجه به تغییرات مکانی مؤلفه تبخیر-تعرق در شکل (۷-الف)، مقدار ET از ۵۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر در سال از شمال به جنوب حوضه تغییر می‌کند. در جهت غرب به شرق حوضه نیز مقدار آن از ۵۰۰ میلی‌متر تا ۴۰۰ میلی‌متر در نوسان است. آنچه از ترکیب نتایج شکل‌های بالا به‌دست می‌آید این است که در زیرحوضه‌های با بارش بیش‌تر تبخیر و تعرق بیش‌تر است (در مناطق شمالی) همچنین هرچه بارش کم‌تر باشد (در مناطق جنوبی حوضه)، تبخیر و تعرق نیز کم‌تر است.

بخشی از آب حاصل از بارش در خاک نفوذ پیدا می‌کند، نفوذ یک اندازه‌گیری هیدرولوژیکی از حجم آبی است که می‌تواند وارد خاک شده از ناحیه ریشه عبور کند و سفره‌های آب کم عمق و یا عمیق را تغذیه کند (Miller et al., 2002). آب‌های زیرزمینی از نزولات جوی که به داخل زمین نفوذ می‌کند، منشأ می‌گیرند. مدل SWAT+ مقدار آب ذخیره‌شده در هر لایه خاک را برای هر HRU محاسبه می‌کند. مقدار ذخیره متوسط سالانه مخازن آب زیرزمینی حوضه همان‌گونه که در شکل (۷-ج) نشان داده شده است از مناطق پربارش در سرشاخه رودخانه‌ها در شمال حوضه به مناطق پایین‌دست در جنوب حوضه در حال کاهش است که ثابت می‌کند آب‌های زیرزمینی نیز هم‌چون جریان رواناب سطحی از الگوی بارندگی منطقه پیروی می‌کنند.

رواناب سطحی جریان آبی است که پس از بارش‌های طوفانی، ذوب برف‌ها یا در اثر سایر منابع، روی سطح زمین جریان پیدا می‌کند. شکل (۷-د) توزیع مکانی میانگین رواناب سطحی ماهانه بر روی رودخانه‌های حوضه طشک-بختگان را نشان می‌دهد. مدل‌های ریاضی قابلیت اطمینان بهتری برای ارزیابی رواناب دارند، زیرا دارای داده‌های کم‌تر، فرمول‌بندی ساده‌تر و محاسبه سریع‌تر هستند (Fontaine et al., 2002). در مطالعه حاضر به‌نظر می‌رسد الگوی تغییرات مکانی رواناب سطحی در زیرحوضه‌های مختلف تشابهاتی با الگوی تغییرات مکانی بارندگی دارد، چرا که در مناطق شمالی و بالادستی حوضه رواناب بیش‌تری تولید شده و هرچه به سمت پایین‌دست حرکت کنیم از میزان تولید جریانات سطحی در سطح زیرحوضه‌ها کم‌تر می‌شود که در تغییرات مکانی بارش نیز می‌توان کاهش مقدار بارش‌ها را در جهت حرکت به جنوب شرق حوضه مشاهده کرد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که بارش مهم‌ترین پارامتر برای محاسبه رواناب سطحی است.

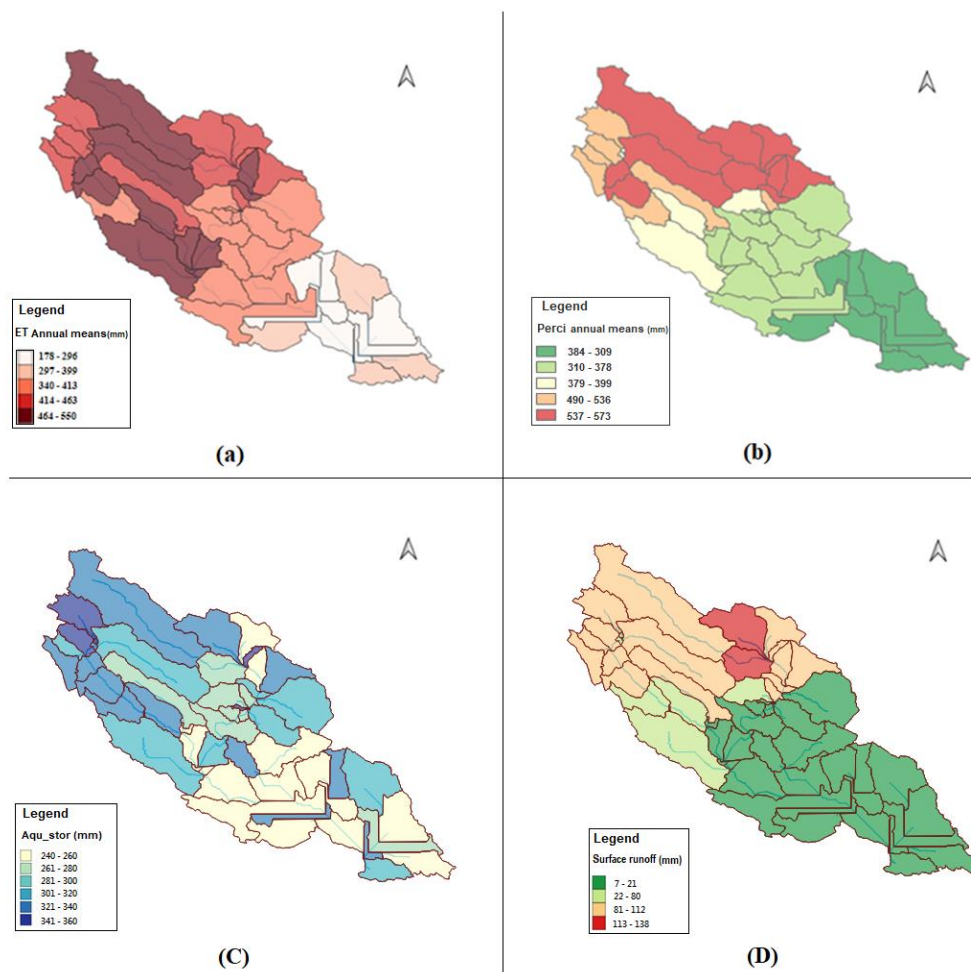


Figure 7. Spatial distribution of annual mean (a) ET (b) Precipitation (c) Aquifer storage (d) surface runoff (mm) in Tashk-Bakhtegan basin

بارندگی در حوضه طشک-بختگان به دلیل تأثیرپذیری از بارش‌های موسمی، جبهه‌های بارشی دریای سرخ و بارش‌های مدیترانه‌ای تغییرات زمانی قابل توجهی دارد. هنگامی که این بارش به‌عنوان مهم‌ترین مؤلفه ورودی به حوضه به‌صورت ورودی مدل SWAT+ ارائه می‌شود، اجزای چرخه آب نیز تحت تأثیر آن، تنوع زیادی را در یک مقیاس زمانی بین سالانه نشان می‌دهند. بنابراین، بررسی تغییرات سالانه بارندگی و تأثیر آن بر سایر اجزای چرخه آب مهم است. با توجه به شکل (۸) که تغییرات تبخیر-تعرق و رواناب را در سطح حوضه در مقابل تغییرات سالانه بارش، به‌مدت ۳۰ سال نشان می‌دهد. سال‌های ۱۹۸۶، ۱۹۹۳، ۱۹۹۸، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۲ که سال‌های پر بارشی می‌باشند، رواناب سطحی نیز زیاد است که مشخص می‌کند رواناب از الگوی بارندگی پیروی می‌کند. با تغییرات افزایش و کاهش بارندگی در طول دوره مورد بررسی، پارامتر تبخیر-تعرق نیز تغییر کرده و روند صعودی یا نزولی دارد. تغییرات تبخیر-تعرق به‌طور کامل هماهنگ با تغییرات بارش نیست به‌طوری که در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۰-۲۰۰۲ مقدار تبخیر-تعرق بیش‌تر یا مساوی مقادیر بارندگی در همان سال‌ها است، اما روند کلی تغییرات آن‌ها نشان از اشتراکاتی دارد. در کل می‌توان نتیجه گرفت که بارش اثرگذاری زیادی بر پارامترهای رواناب سطحی و تبخیر-تعرق دارد و الگوی تغییرات آن‌ها تطابق بسیار خوبی با الگوی تغییرات بارندگی دارند و نوسانات آن‌ها مشابهت زیادی با هم دارند.

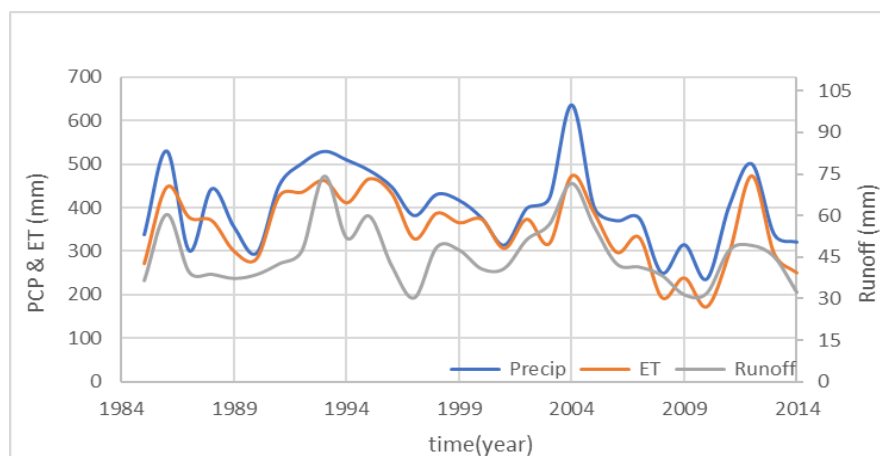


Figure 8. Annual changes in the components of evaporation, transpiration, precipitation and runoff of the basin

۳.۶. نتایج بررسی اثرات اقدامات انسانی و اقلیمی بر مؤلفه‌های بیلان منابع آب

در بخش دیگری از نتایج پژوهش، مؤلفه‌های بیلان آبی برآوردشده توسط مدل SWAT+ در مراحل قبل، از جنبه تأثیرات اقدامات انسانی و اقلیمی بر آن‌ها در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، به‌منظور محاسبه E در رابطه (۲) از بخش مواد و روش‌ها، مدل SWAT+ با تغییرات ۲۰، ۱۰، -۱۰ و -۲۰ درصدی در سری زمانی داده‌های ایستگاهی مشاهداتی بارش اجرا شد و مقدار جریان خروجی و تبخیر-تعرق حوضه برای آن‌ها استخراج گردید. به همین ترتیب، چهار اجرای مدل برای ۱-، ۱، ۳ و ۲ درجه تغییر در سری زمانی دمای مشاهداتی حوضه صورت گرفت و براساس خروجی‌های به‌دست‌آمده مقدار S برای مؤلفه‌های موردنظر محاسبه گردید. در ادامه تحلیل انجام‌شده برای تفکیک اثر عوامل اقلیمی و انسانی بر تغییر تبخیر-تعرق حوضه و جریان ورودی به دریاچه با استفاده از این رویکرد مورد اشاره قرار گرفته است.

تبخیر-تعرق واقعی در سطح حوضه برای شرایط تغییرات دما و بارش از سناریوهای اجراشده در بخش قبلی استخراج و تابع تغییرات E و S در برابر تغییرات دما و بارش برای آن تهیه گردید (در شکل (۹) قابل مشاهده است). این نتایج نشان می‌دهد که به‌طور متوسط به‌ازای ۱۰ درصد کاهش متوسط بلندمدت بارش در سطح حوضه، مقدار تبخیر-تعرق حوضه حدود ۵۴٪ درصد افزایش می‌یابد. به‌ازای یک درجه افزایش دمای متوسط حوضه نیز مقدار تبخیر-تعرق واقعی آن در حدود ۱۷٪ درصد افزایش می‌یابد. برای مؤلفه آبدهی خالص حوضه نیز به‌ازای کاهش ۱۰ درصدی بارش، مقدار رواناب تولیدی در سطح حوضه ۸٪ درصد افزایش می‌یابد. به همین ترتیب چنانچه دمای متوسط سالانه یک درجه افزایش یابد، کاهش تولید رواناب حوضه در اثر آن در حدود ۴۶٪ خواهد بود. نکته قابل توجه در شکل (۹) حساسیت بیش‌تر مؤلفه رواناب نسبت به تغییرات دمای هوا و بارش است که به‌خوبی با مشاهده روند تغییرات و مقادیر E و S در مقدار افزایش دمای یک درجه‌ای و کاهش ۱۰ درصدی بارش قابل تشخیص است. نکته مهم دیگر، عدم ثابت‌بودن روند حساسیت آبدهی نسبت به تغییرات دما و بارش در مقایسه با تبخیر-تعرق می‌باشد، به‌طوربه‌طوری که با افزایش پارامترهای دما و بارش، مقادیر تبخیر-تعرق کاهش می‌یابد، درحالی که برای جریان، افزایش دما سبب کاهش و افزایش بارش منجر به روند صعودی در آن می‌شود. با توجه به مطالعات بررسی روند سری زمانی دما و بارش در ایستگاه‌های منطقه، میزان تغییرات دما و بارش سالانه در دوره مورد بررسی به‌ترتیب با افزایش ۱/۲ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۱۴ درصدی نسبت به مقادیر متوسط سالیانه همراه بوده است. لذا براساس رابطه (۴) مقادیر S_{ET} و E_{ET} برابر با ۱/۱۵ و ۵۹٪/۰

است و برای محاسبه مقدار حساسیت آبدهی نسبت به تغییرات دما و بارش، مقادیر S_Q و ϵ_Q برای این حالت به ترتیب برابر با $1/4$ - و $1/68$ می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به تغییرات دمایی و بارش حوضه، می‌توان اظهار داشت که سهم عوامل اقلیمی و انسانی از افزایش مؤلفه تبخیر-تعرق در حوضه، به ترتیب برابر با $19/7$ و $80/3$ درصد است. از کاهش آبدهی حوضه نیز مقدار $23/6$ درصد مربوط به کاهش بارش و $1/69$ درصد نیز در اثر افزایش دما بوده است و به طور کلی $25/3$ درصد ناشی از عوامل اقلیمی و $74/7$ درصد نیز طبق رابطه (۵) مربوط به عوامل غیراقلیمی و انسانی (تغییر کاربری اراضی، احداث سدها و تعامل عوامل اقلیمی و غیراقلیمی) است. بررسی اثرات اقلیمی و انسانی در تغییرات مؤلفه‌های بیلان آبی در پژوهش‌های دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله در مطالعه‌ای در سطح حوضه طشک بختگان با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT و استفاد از روش مبتنی بر تحلیل حساسیت هیدرولوژیکی به بررسی این اثرات پرداخته شد و نتایج نشان داد که در کاهش آبدهی حوضه عوامل اقلیمی تأثیری $34/3$ درصدی و عوامل غیراقلیمی و انسانی نیز تأثیر $65/7$ درصدی دارند (Delavar et al., 2020). با مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه حاضر می‌توان متوجه شد که تأثیر عوامل اقلیمی در نتایج مدل SWAT+ نسبت به نتایج مدل SWAT در حدود نه درصد کم‌تر شده و بر تأثیر عوامل انسانی افزوده شده است که علت آن می‌تواند به برآورد تبخیر-تعرق بیش‌تر در مدل SWAT+ برای محصولات و کاربری‌های مختلف (تأثیر کاربری‌های اراضی که خود مرتبط با فعالیت‌های انسانی است) و اثر آن بر کاهش رواناب‌ها و جریانات سطحی باشد که در نهایت منجر به افزایش اثر اقدامات انسانی شده است.

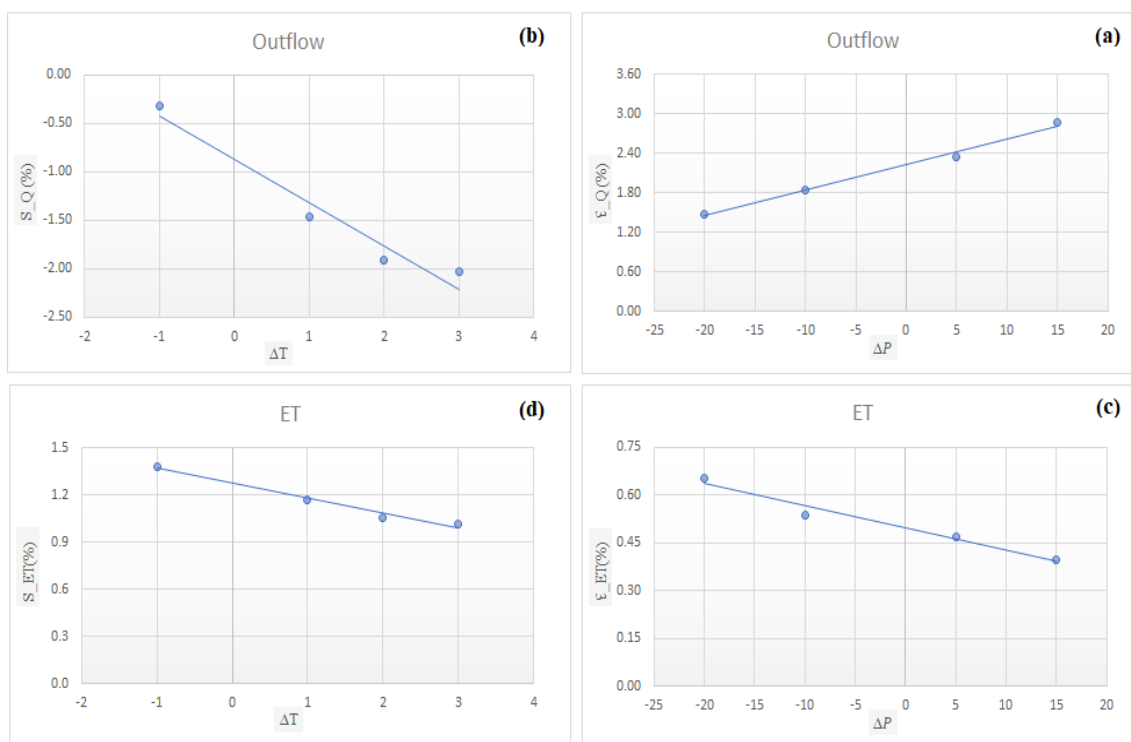


Figure 9. The sensitivity outflow from the basin to a) precipitation changes and b) temperature changes. The sensitivity actual evapotranspiration to c) precipitation changes and d) temperature changes

۴. نتیجه‌گیری

بحران‌های آبی فعلی و پیش رو در کشور و از طرفی ضعف‌های اطلاعاتی و مسائل موجود در زمینه یکپارچه‌سازی و

سازماندهی اطلاعات مدیریتی بین بخشی، تخمین صحیح منابع و مصارف منابع آب و همچنین ارزیابی جامع گزینه‌های مدیریتی، لزوم وجود ابزارها و زیرساخت‌هایی که امکان بهبود تصمیم‌گیری‌ها و جهت‌گیری‌های مدیریتی را فراهم آورد، آشکار می‌سازد. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی و استفاده از مدل SWAT+، به‌عنوان نسخه جدید مدل SWAT در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز است. در این مطالعه با برآورد مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه طشک-بختگان و مقایسه آن‌ها با نتایج سایر مطالعات انجام‌شده در منطقه به نوعی کارایی این مدل در برآورد مؤلفه‌های بیلان آبی موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور نتایج حاصل از مدل SWAT+ با نتایج بیلان آب حاصل از شبیه‌سازی SWAT و همچنین نتایج مطالعات، اطلس منابع آب حوضه و به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب منطقه مقایسه و ارزیابی شدند و در ادامه با بررسی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب از لحاظ مکانی و زمانی و همچنین با تعیین سهم اثرگذاری عوامل اقلیمی و انسانی، تلاش شد تحلیل دقیق‌تری از نتایج خروجی مدل و شرایط هیدرولوژیکی حوضه ارائه شود. بر این اساس یافته‌های اصلی پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ارزیابی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT+ نشان داد که مدل عملکرد مطلوبی در شبیه‌سازی جریان و جریان پایه در حوضه‌های بالادست سدها دارد، اما در حوضه‌های پایین‌دست سدها، به دلیل ضعف مدل در اعمال قوانین بهره‌برداری از مخزن، نتایج چندان رضایت‌بخش نیست. نتایج واسنجی تبخیر-تعرق واقعی و عملکرد محصولات نیز نشان می‌دهد که تبخیر-تعرق واقعی شبیه‌سازی نزدیک به مقادیر گزارش شده و قابل قبول است، اما در بخش عملکرد محصولات، نتایج شبیه‌سازی شده مدل برای محصولات هم‌چون برنج، پیاز، سیب‌زمینی، گوجه و چغندر کم برآورد است. در پژوهش‌های مشابهی توسط *Abbaspour et al.* (2009) و *Arnold et al.* (2012) و همچنین پژوهشی که توسط *Delavar et al.* (2020) در سطح حوضه طشک بختگان انجام شد نیز نتایج واسنجی عملکرد محصولات نشان از برآورد پایین آن توسط مدل شبیه‌ساز SWAT برای برخی محصولات داشت که علت اصلی آن را می‌توان در کمبود اطلاعات و ضعف مدل‌ها در شبیه‌سازی اختلاف عملکرد محصولات در شرایط محیطی، مدیریتی و اقلیمی مختلف حوضه دانست. عملکرد هر محصول متأثر از پارامترها و عوامل مختلفی شامل مقدار تبخیر-تعرق گیاه، شاخص‌های رشد گیاهی و منابع مغذی در اختیار گیاه است که تنظیم تمامی این مقادیر در شرایط محیطی و آب‌وهوایی مختلف، با توجه به امکانات مدل و داده‌های موجود امکان‌پذیر نیست.

- مقایسه اجزای بیلان آب برآوردشده توسط مدل SWAT+ با نتایج مطالعات قبلی نشان می‌دهد که بیش‌ترین اختلاف مرتبط با مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و جریان سطحی است. این اختلاف به‌طور عمده مرتبط با تأثیرپذیری بیش‌تر این مؤلفه‌ها از فعالیت‌های انسانی می‌باشد که عملاً امکان لحاظ و در نظر گرفتن آن‌ها با توجه به اطلاعات موجود و ظرفیت‌های مدل‌سازی محدود است. در این خصوص بررسی نقش عوامل اقلیمی و انسانی در تغییرات مؤلفه‌های بیلان نیز مشخص کرد که بیش‌ترین عامل در کاهش مقادیر آبدهی و افزایش تبخیر-تعرق واقعی حوضه مربوط به عوامل انسانی است، به‌نحوی که ۲۵/۳ درصد از سهم کاهش جریان‌ات خروجی و ۱۹/۷ درصد از تغییرات تبخیر-تعرق مربوط به عوامل اقلیمی و مابقی تحت تأثیر عوامل غیراقلیمی و یا انسانی از جمله تغییر کاربری اراضی، احداث سدها و ... است.

- مدل SWAT+ به‌عنوان نسل جدید مدل پرکاربرد SWAT و با ویژگی‌های کاملاً جدید نسبت به نسخه‌های قبلی ارائه شده و براساس ادعای توسعه‌دهنده‌های آن، به گونه‌ای طراحی شده است که عملکردها و ظرفیت‌های پیشرفته‌تری را در مباحث چالش‌برانگیز مدل‌سازی حوضه برای فرایندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب در اختیار مدل‌سازان قرار دهد. SWAT+ در تعریف برنامه‌های مدیریتی، ارتباط منطقی اجزای بیلان آبی و اتصال سیستم‌های جریان مدیریت شده به شبکه جریان طبیعی، انعطاف‌پذیری بیش‌تری نسبت به SWAT ارائه می‌دهد. اما سوابق کاربرد این مدل محدود و از

طرفی عمده کارها و پژوهش‌های انجام شده با آن نیز مربوط به مناطق معتدل و پربارش است. هرچند در این مطالعه ارزیابی کلی نتایج واسنجی مدل SWAT+ و مقایسه نتایج آن با سایر مطالعات انجام شده در حوضه حاکی از عملکرد قابل قبول این مدل در شبیه‌سازی و تفکیک سهم عوامل مختلف اقلیمی و انسانی در شرایط هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه می‌باشد، اما لازم است کارائی این مدل در مناطق متنوع اقلیمی و با شرایط آب‌وهوایی مختلف از جمله مناطق گرمسیری و خشک و نیمه‌خشک مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد تا از میزان و نحوه کارایی مدل در این مناطق نیز اطلاعاتی به دست آید و نقاط ضعف و قوت آن بیش‌تر شناسایی شود. با توجه به اهمیت داده‌ها و اطلاعات ورودی به مدل و تأثیر آن بر نتایج خروجی مدل، پیشنهاد استفاده از داده‌های سنجش از دور یا داده‌های پایگاه‌های جهانی برای تکمیل اطلاعات ورودی به مدل در دقت اطلاعات خروجی و کاهش عدم قطعیت آن می‌تواند اثرگذار باشد. مطالعات بیش‌تر با استفاده از مدل در حوضه‌های دارای سیستم‌های مخزنی و ذخیره‌سازی، می‌تواند به شناخت بیش‌تر از جداول تصمیم و به‌کارگیری درست آن‌ها کمک کند و عدم قطعیت ناشی از استفاده از این جدول‌ها را کاهش دهد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Bosque
2. Landscape Unit
3. Hydrological Response Unit
4. Warm-up period
5. Coefficient of determination
6. Decision table

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-150
- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & 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.
- Amiri, M. (2008). Model calibration and evaluation to simulate hydrological SWRRB runoff (Case study: Kesilian watershed). *Natural resources of Iran*. (In Persian)
- Ansari, M.R., Gorji, M., Sayyad, G.A., Shorafa, M., & Hammadi, K. (2016). Simulation of runoff in rood zard basin using arc swat model. *Irrigation sciences and engineering. Scientific journal of agriculture*, 38(4), 97-107. (In Persian)
- Bailey, R.T., Park, S., Bieger, K., Arnold, J. G., & Allen, P. M. (2020). Enhancing SWAT+ simulation of groundwater flow and groundwatersurface water interactions using MODFLOW routines. *Environmental Modelling & Software*, 126, 104660
- Bailey, R.T., Bieger, K., Flores, L., & Tomer, M. (2022). Evaluating the contribution of subsurface drainage to watershed water yield using SWAT+ with groundwater modeling. *Science of the Total Environment*, 802, 149962.
- Barati, F., Hosseini, M., Saremi, A., & Mokhtari, A. (2020). Simulation of Hydrological Balance in Eskandari Watershed Using SWAT Model and algorithms SUFI2. *JWMSEIR*, 14 (48), 90-99. (In Persian)
- Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 115-130.

- Dechmi, F., Burguete, J., & Skhiri, A. (2012). SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 470, 227-238.
- Delavar, M., Morid, S., & Raeisi, L. (2020). Implementation of the WA+ water accounting system at the basin level and the challenges (Lessons Learned from the Case Study of Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*, 16(2), 346-362. (In Persian)
- Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schulin, R., & Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23, 486-501.
- Farokhnia, A., & Morid, S. (2014). Assessment of GRACE and GLDAS Capabilities for Estimation of Water Balance in Large Scale Areas, a Case Study of Urmia Lake Watershed. *Iran-Water Resources Research*, 10(1), 51-62. (In Persian).
- Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., & Hotchkiss, R.H. (2002). Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT), *Journal of Hydrology*, 262 (1-4), 209-223, DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00029-X
- Hosseini, M., Ghafouri, A.M., Amin, M.S., & Tabatabaei, M.R. (2010). Effect of Landuse Changes on Water Balance in Taleghan Catchment, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(5), 1159-1172. (In Persian).
- Kakarndee, I., & Kositsakulchai, E. (2020). Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddyfield dominated basin, northeast Thailand. The 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference (TSAE 2020).
- Miller S.N., Kepner W.G., Mehaffey M.H, Hernandez M., Miller R.C., Goodrich D.C., Devonald F.K., Heggem D.T., & Miller W.P. (2002). Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for Land Cover change analysis, *Journal of the American Water Resources Association*, 38 (4), 915-929, DOI: 10.1111/j.1752-1688.2002.tb05534.x
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Ndomba, P.M., & Birhanu, B.Z. (2008). Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine*, 1, 41-52.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S F., Heidar pour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences*, 53, 977-988.
- Santhi, C., Muttiah, R. S., Arnold, J. G., & Srinivasan, R. (2005). A GIS-based regional planning tool for irrigation demand assessment and savings using SWAT. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 137-147.
- Seckler, D. (1999). Revisiting the IWMI paradigm: Increasing the efficiency and productivity of water use. International Water Management Institute: <https://www.iwmi.cgiar.org>
- Thampi, S., Raneesh, K., & Surya, T. V. (2010). Influence of scale on SWAT model calibration for stream flow in a river basin in the humid tropics. *Water Resources Management*, 24(15), 4567-4578.
- Van Tol, J., Bieger, K., & Arnold, J. G. (2021). A hydrogeological approach to simulate streamflow and soil water contents with SWAT+. *Hydrological Processes*, 35(6), e14242.
- Vano, J. A., & Lettenmaier, D. P. (2014). A sensitivity-based approach to evaluating future changes in Colorado River discharge. *Climatic Change*, 122, 621-634.
- Vano, J.A., Das, T., & Lettenmaier, D.P. (2012). Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature. *Journal of Hydrometeorology*, 13, 932-949.
- Van Liew, M. W., Veith, T. L., Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. *Journal of Hydrologic Eng*, 12(2), 173-189.
- Wagner, P. D., Bieger, K., Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2022). Representation of hydrological processes in a rural lowland catchment in Northern Germany using SWAT and SWAT+. *Hydrological Processes*, 36, e14589.
- Zare Garizi, A., & Talebi, AS. (2016). Water balance simulation of watershed using SWAT model (Case study: Ghare Soo basin of Golestan province). *Journal of Water Resources Engineering/ Ninth Year/ Fall 2016*. (In Persian)