



Prediction of spatial and temporal variability of soil moisture in marghab watershed using swat

Padideh Javadi¹, Hossein Asadi², Aliasghar Besalatpour³, Majid Vazifedoust⁴

1. Corresponding Author, Department of Soil Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: padideh.javadi@ut.ac.ir

2. Department of Soil Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: ho.asadi@ut.ac.ir

3. Institut für Ressourcenmanagement, Berlin, Germany, Email: besalatpour@gmail.com

4. Department of Soil Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. vazifedoust@guilan.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 6, 2022

Revised: Nov. 12, 2022

Accepted: Nov. 22, 2022

Published online: Dec. 22, 2022

Keywords:

Runoff ,
Model sensitivity analysis,
Land Use,
Digital Elevation Model
Uncertainty.

ABSTRACT

The integrated maps of soil moisture having high spatial resolution and appropriate quality are of great importance in land management. Due to the lack of monitoring stations in watersheds, especially in mountainous areas, field monitoring of soil moisture is a time-consuming, costly and error-prone process. SWAT model was used to obtain a suitable method for spatial and temporal simulation of soil moisture in the Marghab watershed of Khuzestan province with an area of 690 km². The daily meteorological data of Barangard and Izeh synoptic stations, soil and land use maps, and digital elevation model were used as inputs to the model. The SUFI-2 program was used for calibration, sensitivity and uncertainty analysis, and validation of the model using the runoff data of Jologir-Marghab hydrometric station. The model was run from 2003 to 2019 for calibration and from 1995 to 2002 for validation, with a three-year warm-up from 1992-1994. Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and determination coefficient (R²) were used to determine the goodness of fit of the model, and P-Factor and R-Factor indices were used to determine the degree of uncertainty. Based on the simulated and observed monthly runoff hydrographs as well as the statistical criteria, the SWAT performance in simulating monthly runoff was acceptable both in the calibration and validation periods. The NSE, R², P-Factor, and R-Factor were 0.76, 0.73, 0.68, and 0.62, respectively in the calibration period, and 0.73-0.71-0.60 and 0.65, respectively in the validation period. After model calibration and validation, soil moisture maps were obtained for the 1995-2019 period. The results indicated that SWAT model is a promising tool for simulating soil moisture in the catchment area with appropriate spatial (sub-basin scale and hydrological response units) and temporal (monthly and annual scale) distributions.

Cite this article: Javadi, P., Asadi, H., Besalatpour, A.A., & Vazifedoust, M., (2022) Prediction of Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture in Marghab Watershed Using SWAT. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2365-2382. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348271.669353>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348271.669353>



برآورد تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک در حوضه آبخیز مرغاب با استفاده از SWAT

پدیده جوادی^۱، حسین اسدی^۲، علی اصغر بسالت پور^۳، مجید وظیفه دوست^۴۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: padideh.javadi@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ایمیل: ho.asadi@ut.ac.ir۳. موسسه مدیریت منابع، برلین، آلمان، ایمیل: besalatpour@gmail.com۴. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، ایمیل: vazifedoust@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تهیه نقشه یکپارچه رطوبت خاک با وضوح مکانی بالا و کیفیت مناسب اهمیت زیادی در مدیریت اراضی دارد. با توجه به کمبود ایستگاه‌های پایش در حوزه‌های آبخیز به‌ویژه در مناطق کوهستانی، مطالعات میدانی پایش رطوبت خاک فرآیندی زمان‌بر، پرهزینه و با خطا است. جهت دستیابی به روشی مناسب برای شبیه‌سازی مکانی و زمانی رطوبت خاک در حوضه آبریز مرغاب استان خوزستان با مساحت ۶۹۰ کیلومترمربع، از مدل SWAT استفاده شد. از داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه باران‌سنجی بارانگرد و سینوپتیک ایزده و نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و رقمی ارتفاع به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. جهت تحلیل حساسیت، واسنجی، عدم قطعیت و اعتبارسنجی مدل از برنامه SUFI-2 و آمار رواناب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر- مرغاب استفاده گردید. سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ میلادی برای واسنجی و سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۵ میلادی برای اعتبارسنجی مدل با سه سال دست‌گرمی ۱۹۹۴-۱۹۹۲ به کار گرفته شد. برای تعیین نکویی برازش مدل در شبیه‌سازی رواناب از ضرایب نش‌سانتکلیف (NSE) و ضریب تبیین (R^2)، برای تعیین درجه عدم قطعیت از شاخص‌های P-Factor و R-Factor استفاده شد. با توجه به هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای رواناب ماهانه و معیارهای آماری، مدل SWAT در هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی دارای نتایج خوب در شبیه‌سازی رواناب بود. مقادیر ضرایب NSE، P-Factor، R2 و R-Factor در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۷۳، ۰/۶۸ و ۰/۶۲ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۷۱، ۰/۶۰ و ۰/۶۵ بود. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، نقشه‌های رطوبت خاک در سری زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۹ استخراج گردید. نتایج نشان داد، مدل‌سازی SWAT ابزاری امیدوارکننده‌ای جهت شبیه‌سازی رطوبت خاک در حوضه آبریز با توزیع مکانی (مقیاس زیر حوضه و واحدهای پاسخ هیدرولوژی) و نیز زمانی (مقیاس ماهیانه و سالیانه) مناسب است.
واژه‌های کلیدی: رواناب، تحلیل حساسیت مدل، کاربری اراضی، مدل رقمی ارتفاع، عدم قطعیت.	

استاد: جوادی؛ پدیده، اسدی؛ حسین، بسالت پور؛ علی اصغر، وظیفه دوست؛ مجید، (۱۴۰۱) برآورد تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک در حوضه آبخیز مرغاب با استفاده

از SWAT، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۳۸۲-۲۳۶۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348271.669353>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348271.669353>

مقدمه

رطوبت در حوضه آبخیز، در طراحی روش‌های مناسب جهت کنترل خشک‌سالی، رواناب، میزان آب قابل دسترس گیاه، تبخیر و تعرق و مدیریت منابع آب نقش مهمی را بازی می‌کند (Tóth *et al.*, 2019). میزان رطوبت در سطح خاک و عمق مؤثر ریشه، متأثر از میزان بارندگی، نفوذ و تبخیر و تعرق است که برخی از مهم‌ترین پدیده‌های چرخه هیدرولوژیکی هستند

(Fan *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020) که بر تعاملات مختلف زمین و جو حاکم است و در نتیجه بر پارامترهای آب و هوایی تأثیر می‌گذارد (Valayamkunnath *et al.*, 2019; Mishra *et al.*, 2018). رطوبت خاک نقش مهمی در فرایندهای اکوسیستم از جمله چرخه‌های انرژی، آب و کربن ایفا می‌کند (Seneviratne *et al.*, 2010) بنابراین، تعیین مقدار رطوبت خاک برای ارزیابی میزان تبدلات انرژی بین هوا و خاک (Li *et al.*, 2018)، رژیم حرارتی خاک (Lehnert, 2014)، مقدار آلدو (Luo *et al.*, 2019) و پوشش گیاهی (Brevik *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2018) نیز ضروری می‌باشد.

در مناطق کوچک، از مشاهدات میدانی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک باکیفیت بالا استفاده می‌شود، اما چنین رویکردی برای نقشه‌برداری در مقیاس منطقه‌ای بسیار سخت و پرهزینه است. با توجه به کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، برآورد آن اغلب با خطا همراه است (Fatholomi *et al.*, 2020). در گذشته به منظور انجام تحقیقات و مطالعات پدیده‌های سطحی زمین و جو مجبور به جمع‌آوری اطلاعات و مشاهدات به‌طور محلی بودند که به علت گستردگی و نیز تغییرات سریع برخی پارامترها، کاری هزینه‌بر و وقت‌گیر بود (Byun *et al.*, 2014).

رطوبت خاک و تغییرات مکانی و زمانی آن یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی است که به دلیل اندازه‌گیری‌های دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر (Al Masmoudi *et al.*, 2021)، تاکنون به‌طور گسترده استفاده نشده است (Niazi *et al.*, 2018). از طرفی نتایج حاصل از مطالعات میدانی نمی‌تواند بیانگر توزیع مکانی رطوبت خاک در کل منطقه باشد. بنابراین قابل‌درک است که استفاده از ابزار دقیق زمینی، گرچه از پتانسیل چشمگیری برخوردار است، اما یک‌راه حل غیرعملی برای پوشش مستمر مکانی و زمانی این پارامتر در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است (Rahimzadeh-Bajgiran *et al.*, 2013).

از جمله روش‌های دستیابی به توسعه پایدار و برطرف نمودن مشکلات مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، استفاده و گسترش مدل‌های ریاضی هیدرولوژی در حوضه‌های آبخیز است که از آن جمله می‌توان به ابزار ارزیابی آب و خاک^۱ (SWAT) اشاره کرد. مدل SWAT یک مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی نیمه توزیعی است که قابلیت شبیه‌سازی پیوسته رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق، فرسایش، رشد گیاه، انتقال عناصر غذایی، جریان آب زیرزمینی، تلفات انتقال در کانال و ذخیره‌سازی در مخزن در بازه‌های زمانی طولانی مدت را دارد (Neitsch *et al.*, 2011). این مدل اساس فیزیکی داشته و در حوضه‌های آبریزی که فاقد آماربرداری منظمی هستند قابل استفاده است. به بیان دیگر SWAT مدلی فیزیکی هست که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، نیازمند اطلاعاتی در مورد آب و هوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوزه هست.

پیشینه پژوهش

محققین با تلفیق مدل SWAT و نرم‌افزار GIS تأثیر شیوه‌های مدیریت زمین بر عملکرد آب، رسوبات و مواد مغذی در ایالت تگزاس آمریکا در حوضه گولف را شبیه‌سازی کردند (Arnold *et al.*, 1998). در این شبیه‌سازی از داده‌های بیش از ۱۰۰۰ ایستگاه اندازه‌گیری در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۹ استفاده گردید. متوسط شدت جریان‌های ماهیانه پیش‌بینی شده با مدل، ۵ درصد بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده تعیین شد. در پژوهش دیگری از مدل SWAT برای تولید داده‌های طولانی‌مدت رطوبت خاک باهدف پایش خشک‌سالی و پیش‌بینی عملکرد محصول در ایالات متحده استفاده گردید (Narasimhan *et al.*, 2005). همچنین محققین توزیع مکانی رطوبت را در سطح خاک و منطقه توسعه ریشه در دو حوضه ایندیانا، ایالات متحده آمریکا برای توسعه پیش‌بینی هیدرولوژیکی با کمک مدل SWAT ارزیابی کردند (Sun *et al.*, 2015).

در پژوهشی برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهایی که روی کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر در حوضه رودخانه تور در کشور سوئیس

^۱ Soil Water Assessment Tool

مؤثرند، از مدل SWAT استفاده شد (Abbaspour et al., 2007). نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رواناب و نترات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر کل به‌طور نسبی خوب بود. همچنین مشخص شد که مدل‌های حوضه‌های بزرگ مقیاس می‌تواند برای مطالعات مدیریت حوضه آبریز مؤثر باشند. در تحقیق دیگری، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط SWAT با استفاده از تصویر ماهواره‌ای MODIS^۱ برای یک جنگل در اسپانیا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که رطوبت شبیه‌سازی شده توسط SWAT، با شاخص‌های نوری و حرارتی سنجش‌ازدور در طول دوره رشد همبستگی داشته است (Jha et al., 2007). در پژوهش دیگری شبیه‌سازی هیدرولوژی در کشور آفریقا را با استفاده از مدل SWAT در یک پروژه جامع و یکپارچه مدیریت منابع آب محاسبه و با قدرت تفکیک مکانی در سطح زیر حوضه و زمان‌های ماهیانه انجام دادند (Schul et al., 2008). همچنین در تحقیق دیگری شبیه‌سازی هیدرولوژی را برای کشور ایران با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام شد (Faramarzi et al., 2010). نتایج مطالعات محققین در کشور ایران نشان می‌دهد بیش از ۴۰ درصد مصرف آب در ۲۳ استان از ۳۰ استان کشور، صرف کشاورزی می‌شود که در ۱۲ استان به نسبت ۱۰۰ درصد و حتی بیش‌تر از آن استفاده می‌گردد. این امر منجر به کمبود شدید آب و کاهش منابع آب زیرزمینی شده است. در پژوهش دیگری شبیه‌سازی هیدرولوژی در کشور آفریقا با استفاده از مدل SWAT در یک پروژه جامع و یکپارچه مدیریت منابع آب محاسبه و با قدرت تفکیک مکانی در سطح زیر حوضه و زمان‌های ماهیانه انجام شد (Faramarzi et al., 2013). در این مطالعه تأثیر تغییرات آب و هوایی بر دسترسی به آب شیرین در آفریقا و در سطح زیرحوضه برای یک دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ بررسی شد. نتایج نشان داد ارزیابی تعداد روزهای خشک و فراوانی وقوع آنها حاکی از افزایش رویدادهای خشکسالی و طول مدت آنها در آینده است. به‌طور کلی، مناطق خشک دارای عدم قطعیت بالاتری نسبت به مناطق مرطوب با هدف پیش‌بینی منابع آب دارا می‌باشد. همچنین با بهره‌گیری از این مدل، پتانسیل برای بهبود بهره‌وری مصرف آب منطقه‌ای و ملی را به خوبی می‌توان پیش‌بینی و مدیریت کرد. در مطالعه دیگری، تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک و دیگر متغیرهای بیلان آب تحت گرادیان بارندگی‌های مختلف حوضه رودخانه زرد چین را ارزیابی شد. نتایج نشان داد که رطوبت خاک رابطه‌ای غیرخطی با بارش و تبخیر و تعرق دارد (Li et al., 2018). از این‌رو، مدل SWAT می‌تواند یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی باهدف پایش رطوبت، رسوب، فرسایش، عناصر غذایی و غیره باشد (Shafiei et al., 2018).

حوزه آبخیز مرغاب یکی از زیرحوضه‌های کارون بزرگ هست که رودخانه کارون پس از پیوستن به اروندرود به خلیج فارس می‌ریزد، از این‌رو به‌عنوان یکی از حوضه‌های مهم اکولوژیک و هیدرولوژیک محسوب می‌گردد با توجه به اینکه رطوبت خاک به‌عنوان یک مشخصه پویا و تأثیرگذار بر روی تراوایی، نگهداشت آب، وضعیت رواناب، میزان تبخیر و تعرق گیاهان نقش مهمی را ایفا می‌نماید، بر اساس بررسی‌های صورت پذیرفته در حوزه مورد مطالعه در مورد وضعیت و تغییرات رطوبت خاک، صرفاً می‌توان به پژوهش رویکرد یادگیری ماشین و تلفیق تصاویر ماهواره‌ای در برآورد رطوبت خاک اشاره نمود (Javadi et al., 2022). اما کارایی مدل SWAT در برآورد رطوبت خاک در این منطقه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در سایر مطالعات صورت پذیرفته در مناطق دیگر ایران و جهان به‌طور غالب محققین جهت واسنجی مدل SWAT برخی از پارامترهای ورودی مدل که تأثیر بسیار زیادی نیز بر روی نتایج مدل‌سازی دارند از قبیل نقشه‌های کاربری اراضی و واحدهای خاک مستخرج از پایگاه‌های داده‌های جهانی را مورد استفاده قرار دادند که بعضاً کوچک مقیاس بودن و یا عدم قطعیت و خطای بالا در تهیه آن‌ها، منجر به شکننده بودن نتایج مدل‌سازی می‌گردد.

در پژوهش حاضر برای رفع این محدودیت از نقشه‌های کاربری اراضی و واحدهای خاک تهیه‌شده بر اساس مشاهدات میدانی در حوزه مرغاب استفاده شد، این تحقیق با اهداف (۱) تهیه نقشه پراکنش مکانی رطوبت در سطوح مکانی مختلف (در سطح زیر حوضه و HRU)، و (۲) پیش‌بینی تغییرات زمانی رطوبت خاک در حوضه آبخیز مرغاب، مورد مطالعه انجام شد.

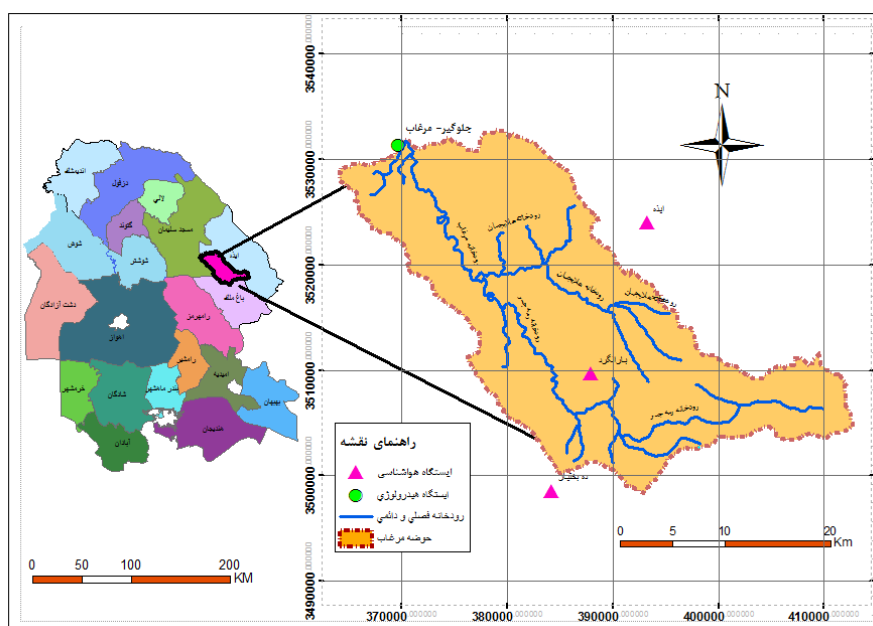
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی ایران و شرق استان خوزستان، حد واسط عرض جغرافیایی ۳۱°۳۷' تا ۳۱°۵۵' شمالی و طول جغرافیایی ۴۹°۳۳' تا ۵۰°۵' شرقی واقع شده است و یکی از زیر حوضه‌های کارون بزرگ به نام مرغاب است که دارای مساحت ۶۸۹۷۳ هکتار است. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی نسبت به استان، شهرستان ایذه و همچنین محل ایستگاه هواشناسی و هیدرولوژی در

^۱ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. ایستگاه هیدرومتری جلوگیر بر روی رودخانه مرغاب در ارتفاع ۴۸۰ متری واقع شده که از سال ۱۳۶۹ جزء ایستگاه هیدرومتری فعال منطقه محسوب می‌گردد.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و موقعیت ایستگاه هیدرومتری، هواشناسی و رودخانه‌ها در استان خوزستان و در محدوده مورد مطالعه

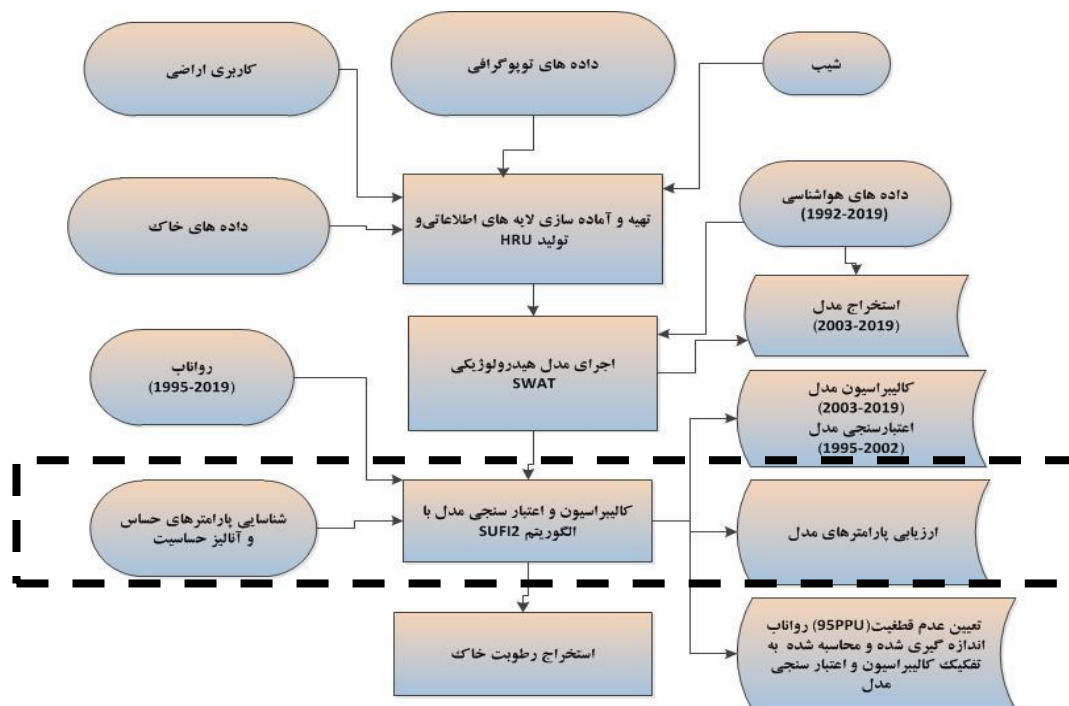
در منطقه مورد مطالعه، ایستگاه تبخیرسنجی بارانگرد قرار دارد که از سال ۱۳۷۰ تأسیس شده و در ارتفاع ۸۲۵ متری از سطح دریا واقع شده است. همچنین از ایستگاه‌های سینوپتیک ایذه در ارتفاع ۷۶۴ متری و دلی بختیار در ارتفاع ۸۵۰ متری در نزدیکی مرز حوضه مرغاب استفاده گردید. میانگین سالانه بارندگی ۳۰ ساله برابر ۶۲۸ میلی‌متر و متوسط دما ۲۱ درجه سلسیوس^۱ است. بیشینه دما نیز ۳۳/۳^{۰۰} در مردادماه و کمینه دما ۹/۳^{۰۰} در دی‌ماه است. ماه‌های خرداد تا شهریور فاقد بارندگی و ماه‌های آذر تا بهمن بیش‌ترین شدت بارندگی را ثبت می‌کند. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب یوستیک و هایپرترمیک است (گزارش مطالعات نیمه تفصیلی اراضی ایذه- باغملک سازمان آب و برق خوزستان) و پتانسیل تبخیر سالانه ۱۷۱۲ میلی‌متر می‌باشد و از لحاظ طبقه‌بندی اقلیمی دوارتن در اقلیم مدیترانه قرار می‌گیرد.

مراحل تحقیق

مراحل تحقیق شامل (۱) تهیه و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع، داده‌های خاک، کاربری اراضی، شیب و تولید واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU^۲)، (۲) تهیه داده‌های هواشناسی و ساخت مدل با استفاده از داده‌های بازه آماری (۲۰۱۹-۱۹۹۲؛ ۳) آنالیز حساسیت مدل در محیط SWAT CUP و انتخاب مؤثرترین پارامترها با استفاده از دبی ماهیانه به روش یک‌بار در هر تکرار (OAT) با بهره‌گیری از دو فاکتور P-value و T-stat، (۴) واسنجی مدل با استفاده از داده‌های بازه آماری ۲۰۱۹-۲۰۰۳، سه سال دست گرمی مدل (۱۹۹۵-۱۹۹۲) و انتخاب متغیر بهینه، (۵) بررسی عدم قطعیت مدل با استفاده از دو پارامتر P-Factor و R-Factor، (۶) اعتبارسنجی مدل در سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۵ و (۷) تعیین میزان رطوبت خاک ماهیانه، بودند که به‌صورت خلاصه در روند نمای شکل ۲ نشان داده شده است.

^۱ Iran Meteorological Organization, 2019

^۲ Hydrological Response Unit



شکل ۲- روند نمای اصلی پژوهش

متغیرهای ورودی مدل

مدل SWAT قابلیت پذیرش متغیرهای مکانی و عددی را به طور همزمان دارا هست. متغیرهای موردنیاز مدل به شرح زیر بودند.

الف- متغیرهای مکانی

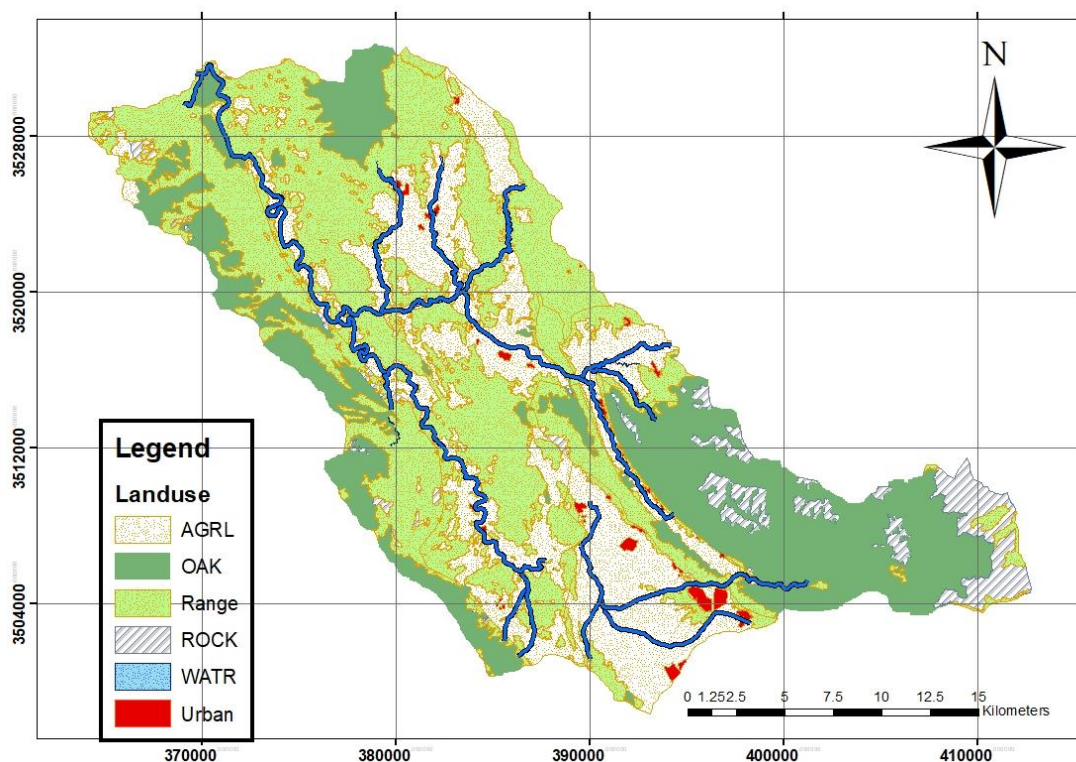
در ابتدا نقشه رستری رقومی ارتفاعی (DEM) با وضوح مکانی ۱۲/۵ متر از ماهواره آلوس^۱، نقشه کاربری اراضی (شکل ۳) و جدول کاربری اراضی (جدول ۱) و نقشه خاک (شکل ۴) و جدول سری خاک (جدول ۲) همراه با اطلاعات توصیفی واحدهای آن (سازمان آب و برق خوزستان با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) به عنوان داده های ورودی مورد استفاده قرار گرفت. نقشه ها به جزء DEM در قالب فایل های وکتوری تهیه و سپس به صورت لایه های رستری در محیط ArcGIS تبدیل و جدول توصیفی شامل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و شیب مدل مبتنی بر استاندارد ورودی مدل^۲ ارائه شده است. واحدهای زمین نمای کوه ها، تپه ها، فلات و تراس های فوقانی و دشت های دامنه ای مهم ترین سطوح ژئومورفیک منطقه می باشند (Zinck et al., 2015; Mousavi et al., 2017). تنوع خاک منطقه شامل ۱۵ سری خاک که سه کلاس بافت لوم، سیلتی لوم و در بخش هایی لوم رسی غالب ترین کلاس های بافت خاک حوزه آبخیز مورد مطالعه می باشند.

جدول ۱- کاربری اراضی

نوع کاربری	علامت اختصاری	درصد پوشش در سطح
مرتع	RNGE	۴۲/۰۱
جنگل بلوط	OAK	۲۵/۷۳
زمین های زراعی دیم	WWHT	۲۵/۶۵
رخمون سنگی	ROCK	۴/۹۸
رودخانه و مسیل	WATR	۰/۸۲
مسکونی	UBRN	۰/۸۱

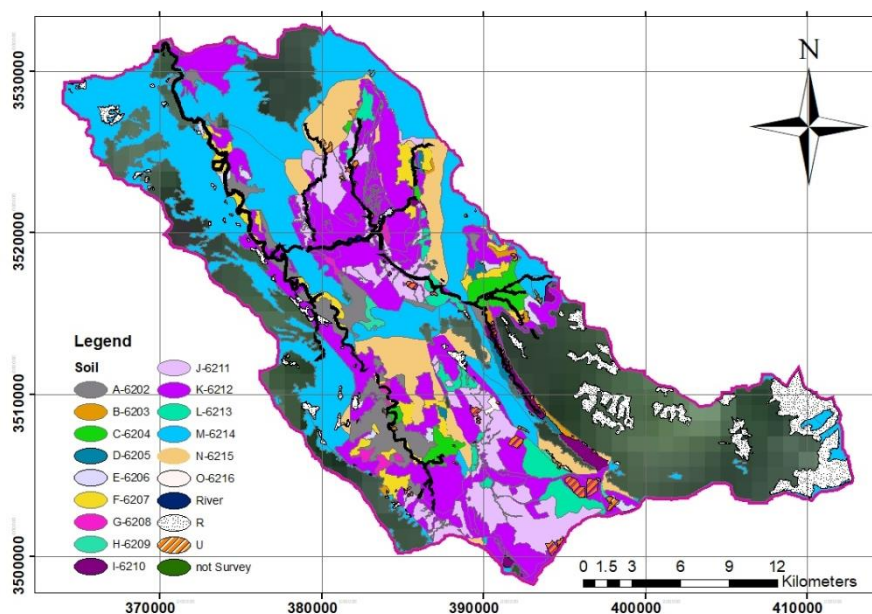
^۱<https://vertex.daac.asf.alaska.edu>

^۲ SWAT input/output file documentation ,version 2012



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی

در عمده مقالات و پژوهش‌ها، ورودی کاربری اراضی و خاک مبتنی بر نقشه جهانی است که با توجه به اینکه به فرمت مدل SWAT درآمده است، اجرای مدل با آن داده‌ها بسیار آسان هست. اما کیفیت مدل تولیدشده متناسب با وضوح مکانی این منابع اطلاعاتی به دلیل کوچک‌مقیاس بودن و عدم پوشش دقیق تغییرات مکانی و امکان تحلیل و بررسی تحقیقاتی بر روی آن ضعیف هست؛ لذا در این پژوهش از پارامترهای ورودی شامل نقشه کاربری اراضی و اطلاعات خاک مطالعه انجام‌شده در منطقه، استفاده شد.



شکل ۴- نقشه خاک در محدوده مورد مطالعه



جدول ۲- سری خاک

U.S.D.A Soil Taxonomy 1999(Revised 2014)			
Sery	Family	Sub Group	Order
A-6202	Loamy,Carbonatic,Hyperthermic,Shallow	Typic Ustorthents	Entisols
B-6203	Loamy Skeletal,Carbonatic,Hyperthermic	Typic Calcustepts	
C-6204	Loamy Skeletal,Carbonatic,Hyperthermic	Typic Haplustepts	
D-6205	Fine,Carbonatic, Hyperthermic	Typic Calcustepts	
E-6206	Fine Loamy,Carbonatic, Hyperthermic		
F-6207	Fine Loamy,Carbonatic,Hyperthermic	Typic Calcustepts	Inceptisols
G-6208	Fine Loamy, Carbonatic, Hyperthermic	Typic Haplustepts	
H-6209	Loamy,Mixed, Hyperthermic	Lithic Haplustepts	
I-6210	Fine Loamy Over Sandy or Sandy Skeletal, m Carbonatic, Hyperthermic	Typic Calcustepts	
J-6211	LoamySkeletalOver Fragmental,Hyperthermic,	Typic Ustorthents	Entisols
K-6212	Loamy Skeletal,Carbonatic, Hyperthermic,	Typic Ustorthents	
L-6213	Fine-Loamy,Carbonatic,Active,Hyperthermic,	Typic Calcustepts	
M-6214	Fine-Loamy, Mixed ,Hyperthermic,	Typic Calcustepts	Inceptisols
N-6215	Fine-Loamy, Mixed ,Hyperthermic,	Typic Haplustepts	
O-6216	Fine Loamy, Carbonatic,Active, Hyperthermic,	Typic Haplustepts	

خاک‌هایی که در سطح سری دارای اسامی مشابه می‌باشند اما در کلاس متفاوت قرار گرفته‌اند نشان‌دهنده وجود تفاوت‌هایی در حالت فاز می‌باشند که جهت بررسی جزئیات بیشتر به گزارش خاک مراجعه شود.

ب- متغیرهای هیدروکلیماتولوژی و عددی

متغیرهای هیدروکلیماتولوژی در یک دوره ۲۸ ساله در منطقه مشتمل بر مقادیر روزانه بارش، درجه حرارت حداقل و حداکثر مربوط به ایستگاه‌های داخل و خارج حوضه (بارانگرد، ایذه و دلی بختیار) به همراه موقعیت‌های جغرافیایی آن‌ها از سازمان هواشناسی استان خوزستان بارگذاری گردید. همچنین ایستگاه هیدروکلیماتولوژی جلوگیر- مرغاب باهدف ثبت مقدار رواناب روزانه حوضه در فرآیند مدل‌سازی استفاده گردید.

در ادامه، داده‌های ورودی در محیط Access تهیه و به مدل اضافه گردید و پس از تهیه Raster و Lookup Table، مدل اجرا شد. در قسمت تولید شیب با توجه به اینکه حداکثر ۵ طبقه در مدل تعریف گردیده است، از این‌رو به شیب‌های ۰-۲، ۲-۵، ۵-۱۲، ۱۲-۴۰ درصد و بیش‌تر از ۴۰ درصد تقسیم گردید. در حین اجرای مدل، حوضه به چندین زیر حوضه منشعب و هر زیر حوضه به تعداد زیادی واحدهای هیدرولوژی (اراضی یکپارچه با پوشش، خاک و مدیریت یکسان) تقسیم شد. این واحدهای HRU دارای ویژگی‌های منحصر به فرد زمین، مدیریت، توپوگرافی و خاک می‌باشند (Abbaspour et al., 2015). در ادامه مدل‌سازی، از داده‌های اقلیمی در سیستم متریک (بارش برحسب میلی‌متر و دما برحسب درجه سلسیوس) به صورت سری زمانی بارگذاری گردید. سپس با وارد کردن کلیه داده‌های مورد نیاز، ساخت مدل در بازه زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۹ (سه سال طول دوره گرم شدن) انجام گرفت. اطلاعات به دست آمده از خروجی مدل شامل فایل‌های خلاصه ورودی‌ها، خلاصه خروجی‌ها، خروجی واحد پاسخ هیدرولوژیک^۳، خروجی زیر حوضه^۴، خروجی آبراهه یا آبراهه اصلی^۵ است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به اینکه مدل امکان ویرایش داده‌های ورودی پس از اجرا را دارد، می‌توان با بهره‌گیری از این ظرفیت، به‌روزرسانی داده‌ها و رفع اشکال به دفعات متعددی تکرار نمود تا به بهینه‌ترین حالت ممکن دست‌یافت.

^۱ Input.std

^۲ Output.std

^۳ Output.hru

^۴ Output.sub

^۵ Output.rch

تجزیه و تحلیل حساسیت

به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر نتایج مدل SWAT، یک بسته نرم‌افزاری تحت عنوان SWAT CUP^۱ توسعه داده شده است که تحلیل‌های عدم قطعیت^۲ و حساسیت را انجام می‌دهد (Abbaspour, 2015). این مرحله از محاسبات با استفاده از الگوریتم SUFI2 (Abbaspour, 2007; et al., 2004) با تکرار ۵۰۰ تا ۵۰۰ نمونه‌برداری لاتین هاپیرکیوب اجرا می‌گردد. در نرم‌افزار SWAT-CUP، برای انجام واسنجی می‌توان از چهار الگوریتم SUFI2، GLUE، ParaSol، MCMC استفاده کرد. در این تحقیق از الگوریتم SUFI2 استفاده شد (Abbaspour et al., 2008)، که قادر است عدم دقت در متغیرهای سریع (مثل بارش باران)، عدم دقت مدل مفهومی، عدم دقت در تخمین پارامترها و عدم دقت داده‌های اندازه‌گیری شده را در نظر گیرد. برای انجام تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و تعیین پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان، از روش یک پارامتر در هر مرتبه^۳ استفاده شد (Abbaspour et al., 2015). در این روش در هر مرتبه اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده و بقیه پارامترها ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر خروجی مدل (در این مطالعه میزان جریان) حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند. پس از انجام هر مرحله شبیه‌سازی با توجه به تابع هدف تعریف شده، پارامترهای حساس، حساسیت-سنجی اولیه، دقت در روابط حاکم بر شبیه‌سازی رواناب و همچنین بررسی مطالعات مشابه رتبه‌بندی پارامترهای حساس با توجه به میزان اثر تغییرات آن‌ها در دامنه مجاز، بر نتایج خروجی مدل صورت می‌پذیرد. بعد از انجام آنالیز حساسیت، پارامترهایی که حساسیت بیش‌تری داشتند انتخاب شد. حساسیت پارامترها مبتنی بر دو معیار P-value و T-stat سنجیده شد (Abbaspour et al., 2017). معیار T-value نشان‌دهنده حساسیت پارامتر است. هرچه مقدار آن کمتر باشد، حساسیت پارامتر بیش‌تر و هرچقدر قدر مطلق آن بیش‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیش‌تر است (Rouholahnejad et al., 2012).

واسنجی مدل

جهت واسنجی مدل، از داده‌های مشاهداتی رواناب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر واقع در خروجی حوضه به‌صورت روزانه در بازه زمانی ۲۰۱۹-۱۹۹۲ استفاده گردید. آماده‌سازی داده‌ها، اجرای مدل و انجام واسنجی در گام زمانی ماهیانه انجام گرفت. در SWAT-CUP از شش معیار ارزیابی دقت برازش مدل استفاده می‌گردد که دو گزاره آماری NSE^۴ و ضریب تبیین (R^2) در این مطالعه استفاده شد. در نرم‌افزار SWAT-CUP کلیه مراحل سعی و خطا توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد و تنها کاربر می‌بایست محدوده منطقی پارامترهای مؤثر بر واسنجی را در قسمت مربوطه به مدل معرفی نماید. با بررسی پوشه پارامترهای حساس در نرم‌افزار SWAT-CUP و تحلیل روند تغییرات دامنه پارامترها به افزایشی یا کاهش‌ی و سپس اجرای مدل (۱۲۰ بار برای این پژوهش اجرای مدل با ۷۰۰-۵۰۰ تکرار و میانگین زمانی ۶-۵ ساعت برای هر دوره مدل‌سازی)، با تمرکز بر پارامترهای عدم قطعیت و متغیرهای هدف، حدود مقدار پارامتر و مقدار بهینه مشخص گردید.

عدم قطعیت مدل

از کل دوره آماری، سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۵ برای اعتبارسنجی و سه سال جهت گرم شدن مدل ۱۹۹۲-۱۹۹۵ مدل‌سازی گردید. در برنامه SUFI2، عدم قطعیت پارامترهای بارش، مدل‌های مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. عدم قطعیت با بهره‌گیری از دو شاخص کمی می‌شود (Abbaspour et al., 2004; 2007). عامل P-factor که درصد داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای است که در محدوده بازه حدود اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی مدل قرار می‌گیرند. محدوده ۹۵ درصد با سطوح ۲/۵ درصد و ۹۷/۵ درصد توزیع تجمعی متغیر خروجی به‌دست آمده با تابع نمودار لاتین هاپیرکیوب به دست می‌آید. خارج از محدوده ۵ درصد نشان‌دهنده شبیه‌سازی نادرست (عدم قطعیت) است. یکی دیگر از ابزارهای اندازه‌گیری در طی دوره واسنجی و آنالیز عدم قطعیت، پارامتر R-factor است که متوسط محدوده ۹۵ درصد است که به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده تقسیم می‌شود. بر این اساس که SUFI2، بیش‌ترین داده‌های اندازه‌گیری شده را با کوچک‌ترین محدوده عدم قطعیت ممکن بررسی می‌کند. مقدار بهینه P-factor ۰ تا ۱۰۰ درصد و پیرو آن مقدار R-factor بین صفر و بی‌نهایت است. P-Factor مساوی ۱ و R-factor مساوی صفر در شبیه‌سازی، نشان‌دهنده این است که داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده کاملاً مطابق هم می‌باشند (Abbaspour et al., 2022).

^۱ Calibration Uncertainty Program for SWAT

^۲ Uncertainty analysis

^۳ One Factor at a Time (OAT)

^۴ Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

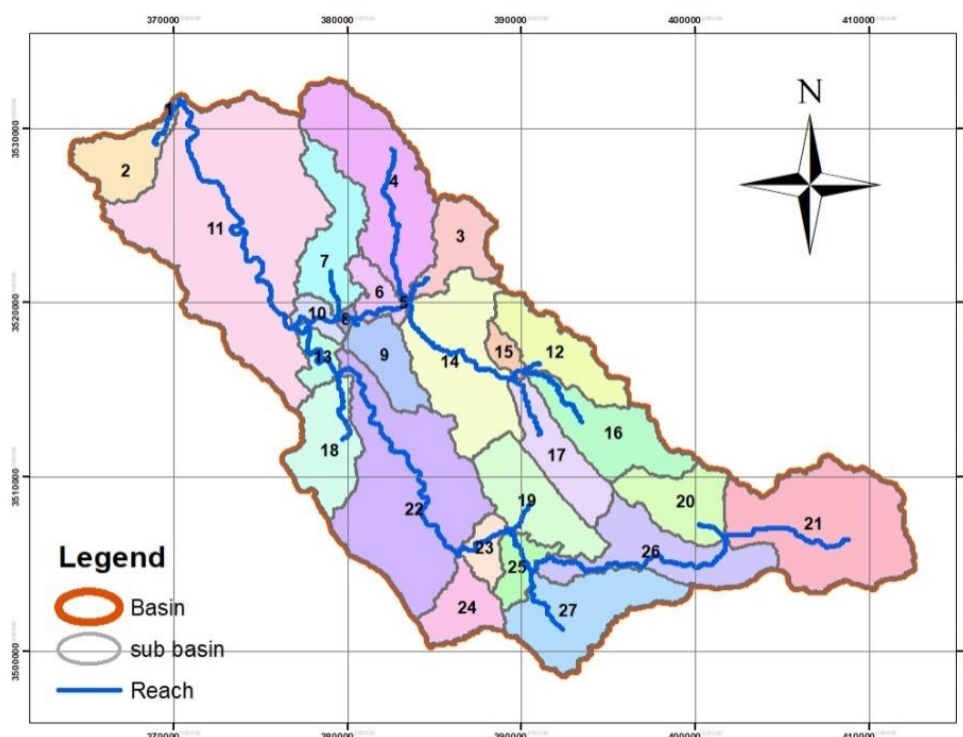
برآورد رطوبت خاک

پس از مدل سازی و دستیابی به مقدار بهینه پارامترها مبتنی بر پارامترهای عدم قطعیت و متغیرهای هدف، در پوشه خروجی مدل، پرونده‌های متعددی تولید شد که مبتنی بر نیاز و هدف مدل سازی می‌توان از خروجی مدل استفاده کرد. با توجه به اینکه هدف این پژوهش تمرکز بر رطوبت خاک منطقه بوده است، از سه پوشه با پسوند hru arch و std که به صورت text ذخیره شده است استفاده گردید تا پس از وارد کردن داده‌ها در محیط ArcGIS، امکان تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در هریک از زیر حوضه‌ها و HRU به صورت مکانی و زمانی (ماهانه و سالیانه) فراهم شود.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل

پس از اجرای مدل با به‌کارگیری پارامترهای ورودی مدل با تلفیق نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی که شرایط همگنی از لحاظ خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب داشتند تهیه گردید و در نهایت ۲۷ زیر حوضه (شکل ۵) و ۴۵۲ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تعیین گردید. به این ترتیب، بیشترین مساحت مربوط به زیر حوضه شماره ۱۱ با ۱۲۱۳۱ هکتار و کمترین مساحت مربوط به زیر حوضه شماره پنج با ۱/۲۸ هکتار بود. پس از مدل سازی با افزونه SWAT، آنالیز حساسیت مدل با استفاده از نرم افزار SWAT-CUP بر روی ۳۰ پارامتر حساس به فرآیند رواناب صورت گرفت و با استفاده از معیار T-stat و P-value، ۱۱ پارامتر انتخاب گردید. پارامترهای حساس مدل به ترتیب بیشترین حساسیت در منطقه مطالعاتی بعد از واسنجی در جدول ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۵- زیر حوضه‌های مرغاب با استفاده از مدل SWAT

پارامترهای CH_K2, SOL_AWC, GW-DELAY, SOL_K, ALPHA-BF, RCHRG-DP, ESCO, SOL_BD, CN2, GW-REVAP و GWQMN، به ترتیب بیشترین حساسیت را در شبیه سازی جریان حوضه داشتند.

جدول ۳- پارامترهای حساس جریان ماهانه رودخانه‌ای، استخراج شده مدل SWAT CUP با استفاده از نرم افزار الحاقی SUFI2

ردیف	نام پارامتر	علامت	ردیف	نام پارامتر	مخفف
۱	شماره منحنی در شرایط متوسط رطوبتی خاک	CN2	۷	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	GW-DELAY
۲	چگالی ظاهری خاک	SOL_BD	۸	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	SOL_AWC
۳	فاکتور جبران تبخیر از خاک	ESCO	۹	هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی	CH_K2
۴	ضریب نفوذ آبخوان	RCHRG-DP	۱۰	عمق آستانه آب برای آبخوان کم عمق برای جریان برگشتی	GWQMN
۵	ثابت کاهش جریان پایه	ALPHA_BF	۱۱	ضریب آب برگشت سفره‌های کم عمق به پروفیل خاک	GW-REVAP
۶	هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع	SOL_K			

پارامترهای CN2، ALPHA-BF، GW-REVAP جهت مدل سازی هیدرولوژیکی برای فرآیند رواناب (Hosseini et al., 2019) پارامترهای ESCO، SOL_AWC، CH_K2، GWQMN و GW-REVAP جهت مدل سازی رواناب رودخانه گنگا توسط Shivhare (et al., 2018)، و نیز CN2، SOL_BD، ESCO، RCHRG-DP، ALPHA-BF، SOL_K، GW-DELAY در تحقیقی به عنوان مهم ترین پارامترهای حساس معرفی شدند (Valinejad et al., 2014) که مشابه با نتایج تحقیق حاضر در شبیه سازی دبی جریان است.

مقادیر نهایی پارامترها در واسنجی مدل

در جدول ۴ ترتیب و میزان حساسیت هریک از پارامترهای این پژوهش مبتنی بر شاخص‌های آنالیز حساسیت آمده است و نشان می‌دهد که پارامترهای شماره منحنی، چگالی ظاهری خاک، فاکتور جبران تبخیر از خاک به عنوان حساس ترین پارامتر در این پژوهش بودند. پارامترهای دیگر متناسب با مقدار t-stat و P-value از حساسیت کمتری برخوردار بوده‌اند.

جدول ۴- ترتیب و میزان حساسیت هریک از پارامترها در حوضه مرغاب

میزان حساسیت پارامتر		نام پارامتر	میزان حساسیت پارامتر		نام پارامتر
P-value	t-stat		P-value	t-stat	
۰/۵۱	-۰/۶۵	GW-DELAY.gw	۰	-۶۸/۹۸	CN2.mgt
۰/۵۲	-۰/۶۳	SOL_AWC (...).sol	۰	۳/۶۳	SOL_BD (...).sol
۰/۵۳	۰/۶۴	CH_K2.rte	۰/۰۴	-۱/۹۹	ESCO.hru
۰/۷۴	۰/۳۲	GWQMN.gw	۰/۲۸	-۱/۰۵	RCHRG-DP.gw
۰/۹۶	-۰/۰۳	GW-REVAP.gw	۰/۳	۱/۰۳	ALPHA_BF.gw
			۰/۳۱	-۱	SOL_K (...).sol

➤ پسوند بعد از هر پارامتر بیانگر فایل مربوطه که متغیر در آن قرار دارد می‌باشد.

در پژوهش دیگری از ۱۹ پارامتر مورد بررسی جهت بهینه سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد در مدل نیمه توزیعی SWAT، شش پارامتر احساس GWQMN، REVAPMN، HURU_SLP، CN2، SURLAG و CH_K2 شناسایی شد (Ansari et al., 2016). همچنین در یک مطالعه پارامترهایی مانند CN2 (ضریب شماره منحنی SCS)، Surlag (زمان تأخیر رواناب سطحی)، CH (K2 هدایت هیدرولیکی AWC-Sol (ظرفیت آب در دسترس خاک) برای واسنجی مدل به کار برده شد (Shen et al., 2012). همچنین Nourinezhad et al. (2022) از پارامترهای ALPHA_BF، CH_K2، REVAP و CN2 جهت شبیه سازی جریان در حوضه آبریز رودخانه کوهستانی کرج استفاده کردند. بررسی پژوهش‌ها نشان داد که مشابهت بالایی در انتخاب پارامترهای حساس وجود دارد که در اکثر این تحقیقات پارامتر CN که تابعی از نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی و رطوبت پیشین خاک است، به عنوان پارامتری که اثر مهمی در فرایند رواناب دارد، استفاده گردیده است. نتایج مقادیر بهینه ضرایب پارامترها در حوضه مرغاب پس از اجرای مدل (۱۲۰ بار برای این پژوهش اجرای مدل با ۷۰۰-۵۰۰ تکرار و میانگین زمانی ۶-۵ ساعت برای هر دوره مدل سازی)، با تمرکز بر پارامترهای عدم قطعیت و

متغیرهای هدف، حدود مقدار پارامتر و مقدار بهینه در دوره واسنجی مدل در بین سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ در جدول ۵ آمده است.

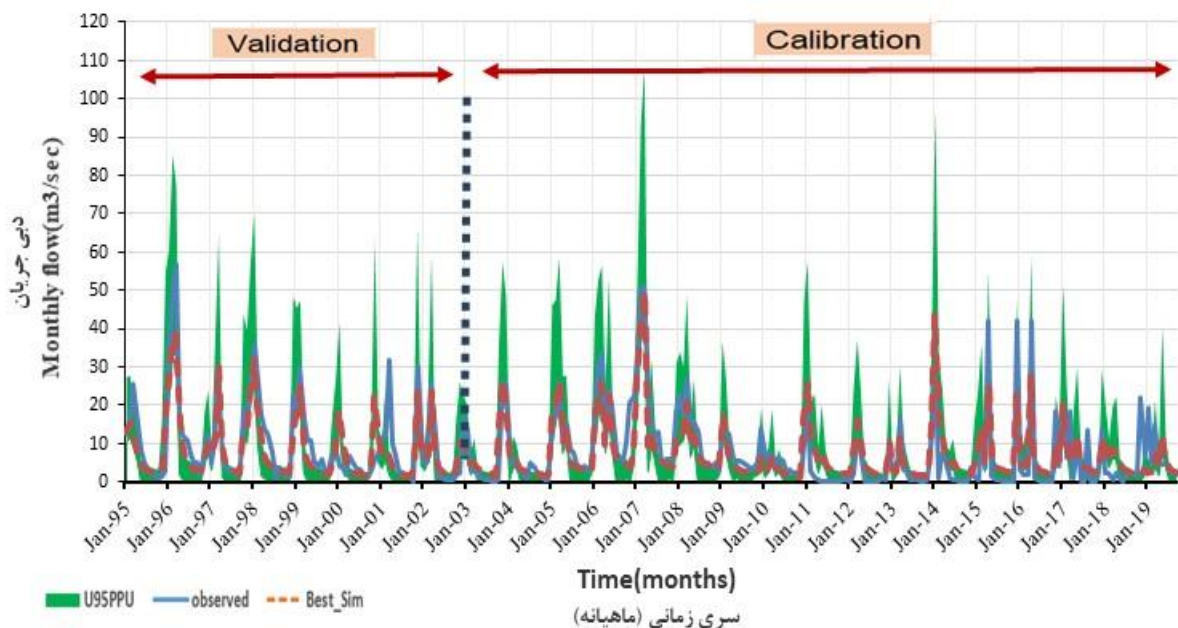
جدول ۵- مقادیر بهینه پارامترها در حوضه مرغاب در دوره واسنجی مدل

حدود نهایی مقدار پارامتر			نام پارامتر
مقدار بهینه پارامتر	کمینه	بیشینه	
۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۴	r_CN2
۰/۳۹	۰/۳	۰/۴	r_SOL_BD
-۰/۳۱	-۰/۵	-۰/۳	r_SOL_AWC
۰/۵۶	۰/۴	۰/۷	r_SOL_K
۰/۹۱	۰/۹	۱	v_ALPHA_BF
۳۸۷	۳۰۰	۴۰۰	v_GW-DELAY
۰/۱۴	۰/۱	۰/۲	v_GW-REVP
۰/۱۸	۰	۰/۲	v_RCHRG-DP
۲۷۹	۲۰۰	۳۰۰	v_GWQMN
۰/۹۷	۰/۷	۱	v_ESCO
۱۱۵	۱۰۰	۱۵۰	v_CH_K2

پیشوند r: در پارامترها به معنای تغییر نسبی مقدار اولیه پارامتر با اعمال ضریب (۱+ مقدار تغییر) هست. پیشوند v: به معنای تغییر مطلق مقدار پارامتر است که با جایگزینی پارامتر با مقدار جدید اقدام می‌شود.

ارزیابی واسنجی دبی جریان

نمودار جریان ماهیانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی توسط مدل در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل، محور افقی تعداد ماه‌های شبیه‌سازی شده و محور قائم مقدار دبی شبیه‌سازی شده (برحسب مترمکعب بر ثانیه) می‌باشند. خطوط آبی‌رنگ مبین مقدار دبی مشاهداتی و خطوط قرمز رنگ بیان‌گر بهترین تخمین با استفاده از پارامترهای مؤثر و باند سبز رنگ حدود اطمینان با سطح احتمال ۹۵ درصد هست. نتایج عملکرد مدل بعد از اجرای تغییرات لازم در مقادیر پارامترهای مؤثر نشان از کاهش واریانس تخمین مقادیر دبی شده است که این روند تا به سرانجام داده مطلوب ادامه پیدا کرد.



شکل ۶- نمودار جریان ماهیانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار الحاقی SUFI2 در طول دوره آماری (۲۰۱۹-۱۹۹۵)

مقدار P-factor و R-factor در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بیش از ۰/۶۰ و مقادیر بالای R^2 ، بیانگر همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی هست. ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) به‌عنوان مهم‌ترین معیار ارزیابی مدل SWAT (عباسپور

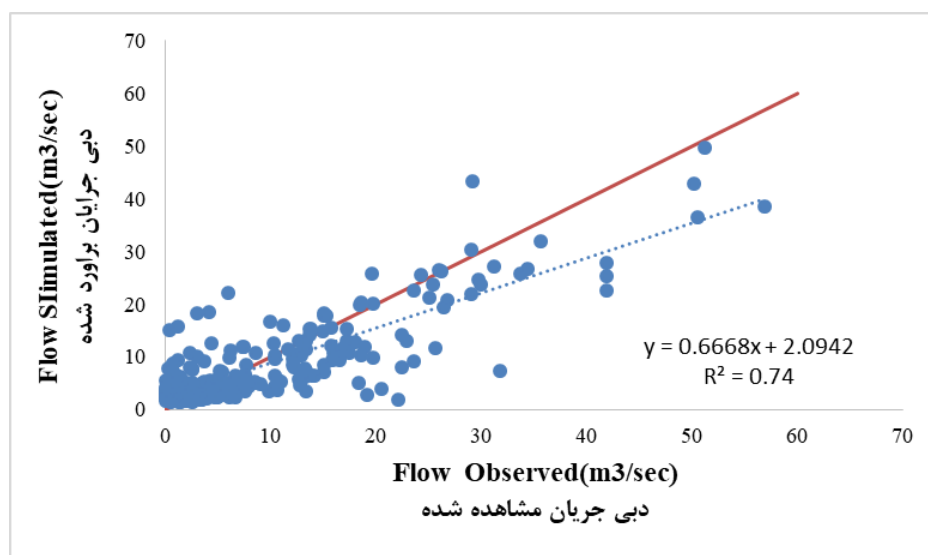
و همکاران، ۲۰۰۷)، حاکی از نتایج رضایت‌بخش و نزدیک به عالی (بر اساس دسته‌بندی (Moriasi et al., 2007) مدل در گام زمانی ماهیانه است. Abbaspour (2022) بیان داشتند اگر ۷۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده دبی رودخانه در دامنه PPU معادل ۹۵ قرار گیرد (ضریب $P \geq 0.7$ ، ضریب $R \leq 1.5$)، شبیه‌سازی رضایت‌بخش است.

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی در حوضه

شاخص ارزیابی	R-Factor	P-Factor	R ²	NSE*
دوره واسنجی (۲۰۰۳-۲۰۱۹)	۰/۶۲	۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۷۳
دوره اعتبارسنجی (۱۹۹۵-۲۰۰۲)	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۷۳	۰/۷۱

* کارایی ناشی-شاتکلیف

برازش نتایج شبیه‌سازی در کل دوره آماری ۲۸ ساله در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۷ آمده است. باوجود نتایج رضایت‌بخش مدل، جدول ۶ و شکل ۸، نشان می‌دهد که مدل دارای بیش‌برآوردی در مقادیر کم و کم‌برآوردی در مقادیر زیاد دبی جریان است. این وضعیت در مورد اغلب مدل‌های هیدرولوژی مشاهده شده است (Sun et al., 2016; Saleh et al., 2000; Gholami et al., 2016).

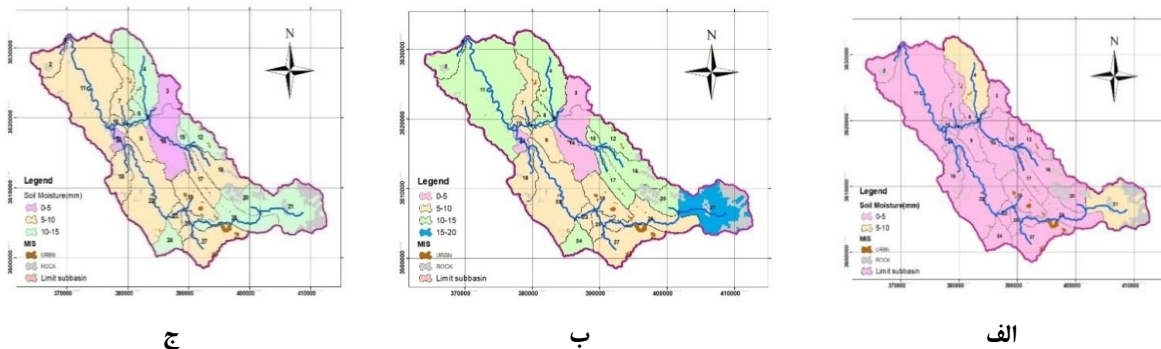


شکل ۷- برازش مقادیر برآوردی رواناب در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در طول دوره آماری برای کل حوضه

نقشه‌های رطوبت خاک

با استفاده از مدل‌سازی، امکان تهیه نقشه رطوبت خاک در بین سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۱۹ در سطوح مختلف زیر حوضه و HRU و نیز گام‌های زمانی مختلف وجود دارد. به دلیل شرایط اقلیم خشک و نیمه خشک در محدوده، رطوبت منطقه در بین دامنه ۰-۵، ۵-۱۰ و سپس ۱۰-۱۵ و ۱۰-۲۰ میلی‌متر پهنه‌بندی شده است.

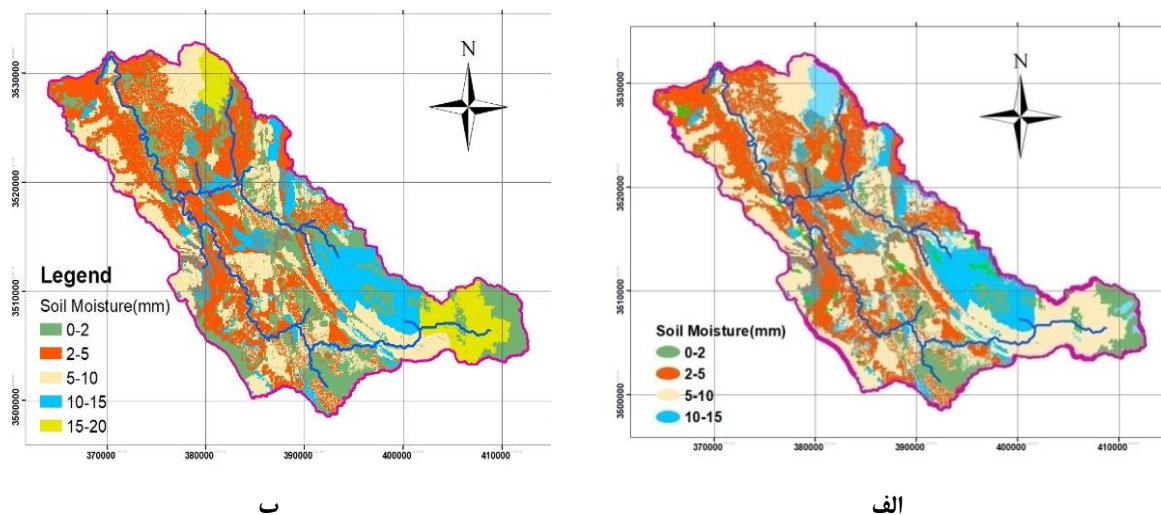
جهت تولید نقشه رطوبت خاک در این دوره ۲۸ ساله، به صورت نمادین، سال‌هایی انتخاب گردید تا بتوان روند تغییرات رطوبت را باهم مقایسه کرد. از این رو باتوجه به اینکه نوسان میزان بارندگی در این حوضه از یک الگوی مشخصی تبعیت نمی‌کنند، لذا مبتنی بر نوسانات اقلیم و شرایط آب و هوایی و نیز میانگین آمار بارندگی در منطقه، سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ به ترتیب به عنوان شاخص خشک‌سالی و ترسالی مبتنی بر مقالات (Keshavarz et al., 2014; Mehravar et al., 2021) و سال ۲۰۱۸ به‌عنوان سال نرمال در طول دوره مدل‌سازی معرفی شد. نقشه میانگین رطوبت سالیانه خاک در سال ۲۰۰۰، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۸ با استفاده از اطلاعات خروجی مدل در سطح زیرحوضه، در شکل ۸ (الف، ب، ج) نمایش داده شده است.



شکل ۸- نقشه میانگین رطوبت خاک در سطح زیرحوضه در سال‌های ۲۰۰۰ (الف)، ۲۰۰۴ (ب) و ۲۰۱۸ (ج)

مقایسه نقشه‌های مدل‌سازی رطوبت خاک در سال‌های مختلف حاکی از آن است که در سال ۲۰۰۰ میلادی به دلیل بارش کم منطقه، تقریباً در کل سطح حوضه، میانگین سالانه رطوبت خاک بین ۵-۱۰ میلی‌متر برآورد شده است، اما در سال ۲۰۰۴ رطوبت خاک بسیار بیش‌تر است به گونه‌ای که در برخی زیرحوضه‌ها میانگین سالانه رطوبت خاک حتی به ۲۰-۱۵ میلی‌متر هم می‌رسد. سال ۲۰۱۸ وضعیتی بینابینی دارد. تغییرات رطوبت خاک به طور کلی از الگوی شیب، کاربری و خاک منطقه پیروی می‌کند. نقشه‌های رطوبت خاک مبتنی بر مدل‌سازی بیانگر این است که در مناطق جنوب شرقی حوضه به سمت شرق و بخش‌های شمالی، بیش‌تر از سایر مناطق حاوی رطوبت خاک است. در این مناطق درصد بالای رطوبت خاک به نسبت سایر مناطق، متأثر از کاربری اراضی، شیب بالای ۲۵ درصد، خاک‌های عمیق و همچنین وجود مواد آلی در ابتدای پروفیل خاک می‌باشد. از این رو با توجه به نوع پوشش گیاهی و سایه‌اندازی جنگل‌های بلوط و ارتفاع، رطوبت بیش‌تری در منطقه مورد مطالعه متمرکز شده است. در همین راستا دیگر پژوهشگران محتوای بالای رطوبت خاک را به اثر فاکتورهای توپوگرافی، تغییرات دما، نوع کاربری اراضی و پوشش گیاهی مرتبط دانستند (Fatholomi *et al.*, 2021). همچنین محققین به بررسی اثر کاربری اراضی بر رطوبت خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تفاوت در نوع کاربری می‌تواند در مقدار رطوبت خاک نقش پررنگی داشته باشد (Maleki *et al.*, 2019). در ادامه در بخش‌های بالادست حوضه به دلیل عمق کم خاک، وجود رخنمون‌های سنگی، پوشش گیاهی ضعیف، کاربری دیم و مراتع، عمده جریان‌های ورودی به صورت رواناب از این قسمت حوضه خارج شده و از رطوبت کم‌تری نسبت به جنگل‌های بلوط برخوردار است و به این ترتیب جریان‌های رواناب در بخش پایین دست آن به دلیل وجود شرایط مناسب از قبیل نفوذپذیری، عمق بیش‌تر خاک، شرایط برای نفوذ آب به خاک فراهم و منجر به افزایش میزان رطوبت در این مناطق گردیده است. بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه مورد مطالعه، اغلب دارای کاربری زراعی دیم هست. در این مناطق به دلیل کاهش ارتفاع، افزایش دما و کاربری پوشش گیاهی یک‌ساله و نیز در قسمت‌هایی به علت عدم رعایت روش‌های مدیریتی حفاظت خاک نسبت به مناطق با پوشش جنگلی و متراکم، از رطوبت خاک کم‌تری برخوردار است. در مورد علت این مشاهدات چنین به نظر می‌رسد که یکی از این عوامل، تغییرات ارتفاع و توپوگرافی در این بخش‌ها (بخش‌های شمالی، جنوب شرقی به سمت شرق) که منجر به دریافت مقادیر مختلف منابع تأمین‌کننده رطوبت خاک (برف و باران) نسبت به سایر مناطق هموار است، که این مطلب توسط سایر پژوهشگران مورد تأیید قرار گرفته است Sayão (Forkuor *et al.*, 2017 ; *et al.*, 2018).

همچنین با استفاده از مدل‌سازی امکان‌تهیه و گزارش نقشه رطوبت خاک در سطح HRU با گام زمانی ماهیانه و سالیانه میسر است که با توجه به مدل‌سازی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۹ قابل‌دستیابی است. در شکل ۹ الف و ب نقشه تغییرات مکانی رطوبت خاک هر یک از واحدهای هیدرولوژیک در دو بازه زمانی ماهیانه (ژانویه) و سالیانه در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است. بر اساس شکل ۹ الف، نتایج بیانگر این است رطوبت خاک در ۴۲ درصد از مساحت منطقه در دامنه ۵-۲ میلی‌متری قرار دارند که بیش‌ترین مساحت حوضه و ۱۱ درصد در دامنه رطوبتی ۲-۰ میلی‌متر، کم‌ترین سطح حوضه را از لحاظ پوشش رطوبتی به خود اختصاص دادند. تغییرات رطوبت در ماه ژانویه ۲۰۱۹ (شکل ۹ ب) در سطح واحد پاسخ هیدرولوژیکی نمایش داده شده است. روند تغییرات رطوبت در سطح HRU با زیرحوضه‌ها نمایش داده شده در شکل ۸ مطابقت دارند.



شکل ۹- نقشه میانگین رطوبت خاک در سطح HRU در سال ۲۰۱۹ (الف) و در ماه ژانویه سال ۲۰۱۹ میلادی

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT انجام گردید. جهت اجرای مدل، پارامترهای خاک، کاربری اراضی و نقشه رقومی ارتفاع به همراه داده‌های روزانه هواشناسی موجود در منطقه مورد استفاده قرار گرفت. جهت تحلیل حساسیت، واسنجی، عدم قطعیت و اعتبارسنجی مدل از برنامه SUFI-2 و داده‌های آمار رواناب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر-مرغاب استفاده گردید. سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۳ میلادی برای واسنجی و سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۵ میلادی برای اعتبارسنجی مدل با سه سال زمان جهت آماده‌سازی مدل ۱۹۹۴-۱۹۹۲ به مدل معرفی گردید. ۱۱ پارامتر حساس از بین ۳۰ پارامتر ورودی شامل پارامترهای شماره منحنی در شرایط متوسط رطوبتی خاک، چگالی ظاهری خاک، فاکتور جبران تبخیر از خاک، ضریب نفوذ آبخوان، ثابت کاهش جریان پایه، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان، ظرفیت آب قابل دسترس خاک، هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی، عمق آستانه آب برای آبخوان کم‌عمق برای جریان برگشتی و ضریب آبی که از سفره‌های کم‌عمق به پروفیل خاک برمی‌گردد، به ترتیب بیش‌ترین حساسیت مبتنی بر دو شاخص آنالیز حساسیت P-value و T-stat را در شبیه‌سازی جریان حوضه داشتند. بر اساس آمار مقادیر ضرایب R^2 ، NSE، P-Factor و R-Factor در دوره واسنجی (۲۰۱۹-۲۰۰۳) به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۷۳، ۰/۶۸ و ۰/۶۲، و در دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۲-۱۹۹۵) به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۷۱، ۰/۶۰ و ۰/۶۵ می‌باشد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در طول دوره‌ی آماری نشان داد که مقادیر P-factor و R-factor کمتر از ۱ بود که بیانگر واسنجی خوب مدل در این حوضه است. ضرایب R^2 و NSE، پارامترهای عدم قطعیت P-Factor و R-factor بیانگر همبستگی بالا بین مقادیر واسنجی با مشاهداتی هست. پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، امکان تهیه نقشه‌های رطوبت خاک مبتنی بر پوشه خروجی مدل در مقیاس مکانی و زمانی در سطح زیر حوضه و HRU با گام زمانی ماهیانه و سالیانه میسر است که می‌تواند نقشه راه مناسب برای بسیاری از مدیریت‌های منابع آب و خاک گردد. توصیه می‌شود عوامل متعدد دیگری همانند تبخیر و تعرق، ساعات آفتابی، نفوذ و ... به دلیل پیچیدگی چرخه هیدرولوژی، در میزان رطوبت خاک مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار بگیرد. نکته قابل‌ذکر این است جهت افزایش NSE، با توجه به پیچیدگی مدل، نیاز به داده‌های بیش‌تر جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل است تا بتوان به بیش‌ترین میزان همبستگی و نش ساتکلیف دسترسی پیدا نماید. مدل مؤلفه‌هایی مانند جریان آب سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی را تک‌تک شبیه‌سازی و درنهایت برآیند آن‌ها را به‌عنوان خروجی ارائه می‌کند، که از این لحاظ امکان کنترل مستقیم مؤلفه‌های جریان وجود نخواهد داشت. از این‌رو جهت رفع این مشکل، ضرورت حداقل تجهیز حوضه‌های معرف را برای تنوع در داده‌برداری وجود دارد. در اینجا بایستی توجه نمود که هدف این نیست که بهترین شبیه‌سازی بر اساس یک اندازه‌گیری آماری را به دست آورد، بلکه هدف دستیابی به بهترین راه‌حلی است که واقعاً در محدوده قابل‌قبول پارامتر باشد. در پایان از دیدگاه کاربردی توصیه می‌گردد، با توجه به اینکه مدل هیدرولوژیکی SWAT، قادر می‌باشد نقشه مکانی و زمانی رطوبت را در کل منطقه مورد مطالعه در واحدهای هیدرولوژیک خاک پیش‌بینی نماید، از این رو نقشه جامع و یکپارچه در دوره‌های زمانی و مکانی مختلف در سایر مناطق مشابه در ایران استفاده گردد. نقشه‌های رطوبت خاک تهیه شده در مقیاس این مطالعه، می‌تواند راهنمای مناسبی



برای مدیران، کارشناسان خاک و آب و بهره‌برداران اراضی جهت برنامه‌ریزی باشند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

- Abbaspour, K. C. (2008). SWAT-CUP2: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Department of Systems Analysis. Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K. C. (2022). The fallacy in the use of the “best-fit” solution in hydrologic modeling. *Science of the Total Environment*, 802, 149713.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S. R. I. N. I. V. A. S. A. N. B., Srinivasan, R., Yang, H., & Klöve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., & Klöve, B. (2015). Modelling hydrology and water quality of the European Continent at a subbasin scale: calibration of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.
- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, 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.
- Al Masmoudi, Y., Bouslihim, Y., Doumali, K., El Aissaoui, A., & Namr, K. I. (2021). Application of the random forest model to predict the plasticity state of vertisols. *Journal of Ecological Engineering*, 22(2).
- Ansari, M. R., Gorji, M., Sayad, G. A., Shorafa, M., & Hemadi, K. (2016). Simulation of Runoff in Rood Zard Basin using Arc Swat Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), 97-107 (In Persian).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Brevik, E. C. (2015, April). Teaching about the Links between Soils and Climate: An International Year of Soil Outreach by the Soil Science Society of America. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 15066).
- Byun, K., Liaqat, U. W., & Choi, M. (2014). Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo-and heterogeneous land surface conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 169-187.
- Fan, K., Zhang, Q., Singh, V. P., Sun, P., Song, C., Zhu, X., & Shen, Z. (2019). Spatiotemporal impact of soil moisture on air temperature across the Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 649, 1338-1348.
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Farzaneh, M. R., Zehnder, A. J., Srinivasan, R., & Yang, H. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology*, 480, 85-101.
- Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., & Abbaspour, K. C. (2010). Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1861-1875.
- Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., Ghorbani, A., Saurette, D., & Biswas, A. (2021). Effect of multi-temporal satellite images on soil moisture prediction using a digital soil mapping approach. *Geoderma*, 385, 114901.
- Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., Ghorbani, A., & Biswas, A. (2020). Comparison of spectral and spatial-based approaches for mapping the local variation of soil moisture in a semi-arid mountainous area. *Science of the Total Environment*, 724, 138319.
- Forquor, G., Hounkpatin, O. K., Welp, G., & Thiel, M. (2017). High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in south-western Burkina Faso: a comparison of machine learning and multiple linear regression models. *PloS one*, 12(1), e0170478.
- Gholami, A., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Vafakhah, M., & Solaymani, K. (2016). Hydrological stream flow modeling in the Talar catchment (central section of the Alborz Mountains, north of Iran): Parameterization and uncertainty analysis using SWAT-CUP. *Journal of Water and Land Development*. (In Persian).

- Hosseini, S., Memarian, H., & Memarian, H. (2019). Using SWAT and SWAT-CUP for hydrological simulation and uncertainty analysis in arid and semi-arid watersheds (Case study: Zoshk Watershed, Shandiz, Iran). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 7(2), 35-44. (In Persian)
- Javadi, P., Asadi, H., & Vazifehdoust, M. (2022). Prediction of Spatial Variations of Soil Moisture Using Random Forest Method and Environmental Features derived from Satellite Images in Marghab Basin of Khuzestan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2859-2874. (In Persian)
- Jha, M. K., Gassman, P. W., & Arnold, J. G. (2007). Water quality modeling for the Raccoon River watershed using SWAT. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 479-493.
- Keshavarz, M. R., Vazifedoust, M., & Alizadeh, A. (2014). Drought monitoring using a Soil Wetness Deficit Index (SWDI) derived from MODIS satellite data. *Agricultural Water Management*, 132, 37-45.
- Lehnert, M. (2014). Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis-Geographica*, 45(1), 5-21.
- Li, J., Wang, S., Gunn, G., Joosse, P., & Russell, H. A. (2018). A model for downscaling SMOS soil moisture using Sentinel-1 SAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 109-121.
- Li, H., Wolter, M., Wang, X., & Sodoudi, S. (2018). Impact of land cover data on the simulation of urban heat island for Berlin using WRF coupled with bulk approach of Noah-LSM. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1), 67-81.
- Luo, W., Xu, X., Liu, W., Liu, M., Li, Z., Peng, T., & Zhang, R. (2019). UAV based soil moisture remote sensing in a karst mountainous catchment. *Catena*, 174, 478-489.
- Maleki, K. H., Vaezi, A. R., & Sarmadian, F. (2019). Validation of satellite-based soil moisture retrievals from SMAP with in situ observation in the Simineh-Zarrineh (Bokan) Catchment, NW of Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(4), 340-350.
- Mehravar, S., Amani, M., Moghimi, A., Javan, F. D., Samadzadegan, F., Ghorbanian, A., & Mirmazloumi, S. M. (2021). Temperature-Vegetation-soil Moisture-Precipitation Drought Index (TVMPDI); 21-year drought monitoring in Iran using satellite imagery within Google Earth Engine. *Advances in Space Research*, 68(11), 4573-4593.
- Mishra, V., & Shah, H. L. (2018). Hydroclimatological perspective of the Kerala flood of 2018. *Journal of the Geological Society of India*, 92(5), 645-650.
- 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.
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Alijani, Z., & Taati, A. (2017). Land suitability evaluation for irrigating wheat by geopedological approach and geographic information system: A case study of Qazvin plain, Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6(3), 275-284.
- Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & Di Luzio, M. (2005). Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Transactions of the ASAE*, 48(3), 1101-1113.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2004). Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2005, Grassland. *Soil and Water Research Laboratory Agriculture Research Services & Black Land Research Center Texas Agricultural Experiment Station*.
- Niazi, Y., Talebi, A., Mokhtari, M. H., & Vazifedoust, M. (2018). Spatio-Temporal Analysis of the Accuracy of TRMM Satellite Data to Estimate the Severity of a Drought Based on Precipitation in Central Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 50(1), 69-85. (In Persian)
- Nourinezhad, S., Rajabi, M. M., & Fathi, T. (2022). Sensitivity and uncertainty analysis of SWAT model in flow, sediment and phosphorus simulation for a mountainous watershed (Case study of Karaj river catchment). *Water and Soil*, 36(2), 167-183. (In Persian)
- Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A. A., Champagne, C., & Omasa, K. (2013). Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 94-103.
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R., & Lehmann, A. (2012). A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 31, 28-36.
- Saleh, A., Arnold, J. G., Gassman, P. W. A., Hauck, L. M., Rosenthal, W. D., Williams, J. R., & McFarland,



- A. M. S. (2000). Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Transactions of the ASAE*, 43(5), 1077.
- Salmani, H., MOHSENI, S. M., Rouhani, H., & Salajegheh, A. (2012). Evaluation of land use change and its impact on the hydrological process in the Ghazaghi Watershed, Golestan province.
- Sayão, V. M., Demattê, J. A., Bedin, L. G., Nanni, M. R., & Rizzo, R. (2018). Satellite land surface temperature and reflectance related with soil attributes. *Geoderma*, 325, 125-140.
- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Srinivasan, R., & Zehnder, A. J. (2008). Modeling blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research*, 44(7).
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.
- Shafiei, K., Porhemmat, J., Sedghi, H., & Hosseini, M. (2018). Investigation the effect of land use changes on the quantity of water resources using remote sensing data and SWAT model (Case study: Maroon basin-southwest of Iran). *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 7(3), 71-87.
- Shen, Z. Y., Chen, L., & Chen, T. (2012). Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 121-132.
- Shivhare, N., Dikshit, P. K. S., & Dwivedi, S. B. (2018). A comparison of SWAT model calibration techniques for hydrological modeling in the Ganga river watershed. *Engineering*, 4(5), 643-652.
- Sun, H., & Cornish, P. S. (2005). Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 795-807.
- Sun, L., & Schulz, K. (2015). The improvement of land cover classification by thermal remote sensing. *Remote Sensing*, 7(7), 8368-8390.
- Sun, X., Bernard-Jannin, L., Garneau, C., Volk, M., Arnold, J. G., Srinivasan, R., & Sánchez-Pérez, J. M. (2016). Improved simulation of river water and groundwater exchange in an alluvial plain using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 30(2), 187-202.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226-238.
- Valayamkunnath, P., Sridhar, V., Zhao, W., & Allen, R. G. (2019). A comprehensive analysis of interpersonal and interannual energy and water balance dynamics in semiarid shrub land and forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, 651, 381-398
- Valinejad, F., Ghorbani, K., Zakerinia, M., Dehghani, A., & Ababae, B. (2014). Performance Assessment of SWAT Model for Estimating Soil Moisture (Case Study: Nomal Watershed). *Journal of Water and Sustainable Development*, 1(1), 57-64. (In Persian)
- Van Liew, M. W., Garbrecht, J. D., & Arnold, J. G. (2003). Simulation of the impacts of flood retarding structures on stream flow for a watershed in southwestern Oklahoma under dry, average, and wet climatic conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(6), 340-348.
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X. ... & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: A comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Science of the Total Environment*, 707, 136092.
- Wang, X., & Melesse, A. M. (2005). Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1359-1376.
- Xie, H., & Lian, Y. (2013). Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 481, 119-131.
- Zinck, J. A., Metternicht, G., Bocco, G., & Del Valle, H. F. (Eds.). (2015). *Geopedology: An integration of geomorphology and pedology for soil and landscape studies*. Springer