



<https://gеп.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 34, Issue 3, No.91, Autumn 2023, pp. 1- 4
Received: 16/07/2022 Accepted: 07/01/2023

Investigating the Effects of Land Use Changes on the Runoff of Qara Chai River Basin Using the SWAT Model

Sayyad Asghari Sersekanroud¹ *, Alireza Saeedi Seta²

1- Professor, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
S.Asghari@uma.ac.ir

2- Master Student, Department of Natural Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
saeedi.seta.alireza1398@gmail.com

Abstract:

The present study analyzed changes in land use and its effects on the runoff of Qara Chai Watershed in Hamadan Province using the SWAT model. To this aim, Landsat OLI-TM satellite images of the years of 2001-2020 were used. First, the relevant images were obtained and the necessary pre-processing steps, including atmospheric corrections, were applied by using the FLAASH method. To increase the classification accuracy, the multispectral images were combined with the panchromatic images and the spatial resolution was enhanced up to 15 m. Then, the classification process was done by using the object-oriented method and the nearest neighbor algorithm. The SWAT model was utilized for hydrological simulation of the basin and SUFI-2 algorithm was applied in SWAT-CUP software for conducting sensitivity analysis, calibration, and validation. Due to the sensitivity of the model to the initial loss parameter, it was recalibrated based on the initial loss values. The values of the coefficients for the calibration period were between 0.72 and 0.90 and the model validation results confirmed the calibration accuracy. Assessment of the efficiency of the model by using Nash Sutcliffe coefficients, p-factor, R, and r-factor indicated its high capability for simulating the related runoff.

Keywords: Land Use, Runoff, SWAT model

*Corresponding Author

Asghari Saraskanroud, S., & Saeedi Seta, A. (2023). Investigating the effect of land use changes on the runoff of the Qara Chai river basin using the SWAT model. *Geography and Environmental Planning*, 34 (3), 1 -4.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



10.22108/GEP.2023.134432.1535



20.1001.1.20085362.1402.34.3.1.0

Introduction

Land use and its fluctuations are among the factors that affect natural cycles in ecosystems. Land use change has several effects on the hydrology of watersheds, such as changing the characteristics of peak discharge, total volume of runoff water, water quality, and hydrological balance. Changing land use and soil cover has some effects on runoff, infiltration, retention, evaporation, transpiration, etc. The runoff caused by rainfall in watersheds causes erosion and loss of surface fertile soil and finally leads to sedimentation in canals, rivers, and reservoirs of dams in addition to human and financial losses triggered by floods. Nowadays, it is possible to study land use changes through satellite images and remote sensing science. The geographic information system as a suitable tool for extracting and classifying information has greatly contributed to the studies related to the effects of land use changes.

SWAT model is a hydrological simulator and a continuous spatio-temporal semi-distributed model with a physical base. It has been used to simulate hydrological processes in complex and vast watersheds with regard to soil changes, land use, and weather conditions during different periods for a long time.

Methodology

Qara Chai Basin with an area of about 11000 km² (based on the political border) is the largest watershed in Hamadan Province. It has got the geographical coordinates of 13° 48' to 29° 49' east longitude and 12° 34' to 35° 44' north latitude. It is drained by Qara Chai River and its branches. This basin is the most flood-prone part of Hamadan Province in terms of flood situation.

In the studied plan, the area of Qara Chai Catchment (11000 km²) was divided into 18 sub-basins. The SWAT model was used to obtain the data of the land use, soil, and slope maps and build the hydrological response units. Separate grids were introduced to the model. After introducing two maps of land use, as well as soil and slope classes, to the SWAT model, all the rasterized maps were combined and integrated to produce the hydrological reaction units of the basin. Due to the fact that the land use maps had changed in two time periods and thus had different characteristics, the hydrological response units were affected by the land use type in addition to the soil type and slope. Therefore, the number of the hydrological reaction units changed.

After forming the basin and hydrological response units, the meteorological data required by the SWAT model were introduced to the model. Then, the output of this model was linked with SUFI-2 program in SWAT-CUP software and the important parameters of the SWAT model for the watershed were sensitized with the help of SUFI-2 algorithm for the statistical period of 2002-2021 by applying the method of one parameter at a time. The parameters, which were more sensitive, were identified and their optimal values were determined. In short, the model was recalibrated for the land uses of 2001 and 2020 during the statistical periods of 2001-2008 and of 2013-2020, respectively. It was validated for the statistical period of 2009-2012. Using the statistical criteria of Nash Sutcliffe coefficient, p-factor, and r-factor both for the calibration and validation periods, the statistical analysis was done and the statistical results were checked by using the SWAT-CUP program.

Results and Discussion

In the present research, land use changes and its effects on the runoff of Qara Chai Basin were analyzed by using the SWAT model. To simulate the runoff by using the mentioned model and SUFI-2 algorithm, the effective parameters on the runoff were identified from among the 29 parameters examined in the sensitivity analysis via the sensitivity analysis technique. 14 variables were found to affect the simulation. Finally, the runoff in the Qara Chai Catchment was identified. Due to the sensitivity of the model to the initial loss parameter, it was recalibrated based on the initial loss values.

Then, using the SUFI-2 algorithm, the model was calibrated and validated for the period of 2001-2020. Examining the efficiency of the model by using Nash Sutcliffe coefficients, p-factor, R, and r-factor resulted in the values between 0.72 and 0.90, which indicated the high capability of the model for simulating the runoff. The validation results of the model also confirmed the correctness of the performed calibration. To measure the influences of land use change on the amount of runoff, two SWAT models were prepared by using two separate land use maps, including those of 2001 and 2020 for Qara Chai Watershed. The results of land use changes from 2001 to 2020 showed that the most changes in land use included those of the lands without vegetation cover with an area of 2550 km² and mixed irrigated and rainfed agriculture lands with an area of 1298.5 km². Changes in the lands without vegetation had been decreasing and those of the lands related to the mixture of irrigated and rainfed agriculture had been increasing. Also, the least changes were related to the pastures (16.6 km²) with poor canopy coverage.

Conclusion

The results related to land use changes from 2003 to 2021 showed that the most changes in land use included those related to the lands without vegetation cover and mixed irrigated and rainfed agriculture lands with the areas of 2550 and 1298.5 km², respectively. The changes were decreasing in the lands without vegetation and increasing in the lands related to the mixture of irrigated and rainfed agriculture. Also, the least changes were related to the pastures (16.6 km²) with poor canopy cover.

Due to the sensitivity of the model to the initial loss parameter, it was recalibrated based on the initial loss values. The validation results of the model showed good validity of calibration. Also, the results of this research revealed that the use of remote sensing techniques and combined images for extracting land use data provided a significant help to accurate studies of the effects of land use changes on runoff and their simulation by the SWAT model.

References

- Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (2011). Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 102(4), 271-279.
- Chen, Y., Xu, Y., & Yin, Y. (2009). Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin, China. *Quaternary International*, 208(1-2), 121-128.
- De Andrade Farias, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., de Assunção Montenegro, A. A., de Sousa Lima, J. R., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2020). Modeling runoff response to land-use changes using the SWAT model in the Mundaú watershed, Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(2), 194-206.
- Ewen, J., & Parkin, G. (1996). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. Method. *Journal of Hydrology*, 175(1-4), 583-594.
- Fohrer, N., Steiner, N., & Moller, D. (2002). Multidisciplinary Trade-off Function for Land Use Option in Low Mountain Ranges Area: A Modelling Approach. *Third International Conference on Water Resources and Environment Research*. Dresden University of Technology, 387-391.
- George, C., & James, E. J. (2013). Simulation of streamflow using soil and water assessment tool (SWAT) in Meenachil river basin of Kerala, India. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 1(2), 68-77.
- Howarth, P. J., & Wickware, G. M. (1981). Procedures for change detection using Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(3), 277-291.

- Koneti, S., Sunkara, S. L., & Roy, P. S. (2018). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Godavari River Basin using the HEC-HMS model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6), 206.
- Li, K. Y., Coe, M. T., Ramankutty, N., & De Jong, R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 258-268.
- Li, Z., Liu, W. Z., Zhang, X. C., & Zheng, F. L. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 35-42.
- Melesse, A. M., & Shih, S. F. (2002). Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 173-183.
- 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.
- Taia, S., Erraioui, L., Mbrenge, N. C., Chao, J., El Mansouri, B., Haida, S., & Taj-Eddine, K. (2021). Assessment of soil erosion using two spatial approaches: RUSLE and SWAT Model. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 234, p. 00082). EDP Sciences.
- Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 447-457.





جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی

سال ۳۴، پیاپی ۹۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲، ص ۱۱۸-۹۵

وصول: ۱۴۰۱/۴/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

مقاله پژوهشی

بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی روی رواناب حوضه رودخانه قره‌چای با استفاده از

مدل SWAT

صیاد اصغری سرسکانرود^{*}، استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

s.asghari@uma.ac.ir

علیرضا سعیدی ستا، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

saeedi.seta.alireza1398@gmail.com

چکیده

در پژوهش حاضر، تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن روی رواناب حوضه قره‌چای در استان همدان با استفاده از مدل SWAT تجزیه و تحلیل شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی بر رواناب حوضه آبخیز قره‌چای، از دو تصویر ماهواره‌ای لندست OLI-TM سال‌های (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) استفاده شد. ابتدا تصاویر مربوطه اخذ و پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات اتمسفری به روش FLAASH اعمال شد. برای افزایش دقت طبقه‌بندی روش تلفیق تصاویر چند طیفی با تصویر پانکروماتیک^۱ انجام شد و قدرت تفکیک مکانی به ۱۵ متر ارتقا یافت. سپس طبقه‌بندی با استفاده از روش شیء‌گرا^۲ و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی صورت گرفت. از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه استفاده و از الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی بهره گرفته شد. با توجه به حساسیت مدل به پارامتر تلفات اولیه، واسنجی مدل براساس مقادیر تلفات اولیه انجام شد. مقادیر این ضرایب برای دوره واسنجی بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۰ و نتایج اعتبارسنجی مدل، نشان‌دهنده تأیید صحت واسنجی انجام شده بود. بررسی کارایی مدل با استفاده از ضرایب ناش ساتکلیف، R^۲ و p-factor و r-factor حاکی از قابلیت زیاد مدل در شبیه‌سازی رواناب است.

واژه‌های کلیدی: کاربری اراضی، رواناب، مدل SWAT.

1. panchromatic
2. object oriented

*نویسنده مسئول

اصغری سرسکانرود، صیاد، سعیدی ستا، علیرضا. (۱۴۰۱). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر روی رواناب حوضه رودخانه قره‌چای با استفاده از مدل SWAT.

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۴ (۳)، ۱۱۸-۹۵.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



10.22108/GEP.2023.134432.1535



20.1001.1.20085362.1402.34.3.1.0

مقدمه

حوضه آبریز یک سیستم باز با ورودی‌های انرژی خورشیدی و نزولات جوی است و با اعمال فرایندهایی روی ورودی‌ها، خروجی‌هایی مانند دبی، رسوب و پوشش گیاهی تولید می‌کند؛ بنابراین خروجی‌های حوضه آبریز تحت تأثیر ویژگی‌های داخلی حوضه از جمله زمین‌شناسی، فیزیوگرافی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی است. اثر تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در نفوذ و رواناب اهمیت زیادی دارد (بلواسی، ۱۳۹۹:۳۳۲). تغییرات کاربری اراضی باعث ایجاد تغییرات بسیار وسیعی در پدیده‌های هیدرولوژیکی می‌شود. تغییر کاربری زمین شامل تغییر نوع کاربری‌ها، نحوه پراکنش و الگوهای فضایی فعالیت‌ها و کاربری‌هاست. آشکارسازی تغییرات، فرایندی است که امکان مشاهده و تشخیص تفاوت‌ها و اختلافات سری زمانی پدیده‌ها، عارضه‌ها و الگوهای سطح زمین را فراهم می‌کند (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۶:۵۱). تغییر کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز اثراتی مانند تغییر خصوصیات دبی اوج، حجم کل آب رواناب، کیفیت آب و تعادل هیدرولوژیکی دارد. رواناب ناشی از بارندگی در حوضه‌های آبخیز علاوه بر خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیل، باعث فرسایش و از بین رفتن خاک حاصلخیز سطحی می‌شود و در نهایت، رسوب‌گذاری در مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها را به دنبال دارد.

درک رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و عوامل به‌وجودآورنده آن و اثرات ثانوی آن بر رژیم هیدرولوژیکی، اطلاعات بارزشی را برای برنامه‌ریزی استفاده از زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی فراهم می‌کند. هرچند تغییرات کاربری اراضی یک حوضه، آشکار، برآورد دقیق این پیامدها بسیار دشوار است. تغییرات شدید کاربری اراضی در کوتاه‌مدت باعث اختلال در سیستم هیدرولوژیکی هم به‌صورت افزایش مقدار آب از طریق سیلاب و هم کاهش آب از طریق کاهش یا حذف جریان کمینه می‌شوند. در این مورد تغییرات کاربری اراضی علاوه بر تغییر جریان سطحی بر جریان زیر سطحی و آب زیرزمینی نیز اثرگذارند؛ از این رو، شناخت آثار تغییر کاربری اراضی بر پاسخ‌های هیدرولوژی حوضه آبخیز مورد مطالعه (قره‌چای) راهگشای تعیین استراتژی مناسب در توسعه پایدار منابع آب حوضه آبخیز است.

برای شبیه‌سازی رابطه بارش - رواناب مدل‌های هیدرولوژی متفاوتی طراحی شده است (نظری پویا و همکاران، ۱۳۹۴:۱۰۰). مدل‌های هیدرولوژی به سه دسته تجربی، مفهومی و مدل‌های با مبنای فیزیکی توزیعی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول این مدل‌ها آشکارا قوانین فیزیکی است که فرایندها را در نظر نمی‌گیرد و فقط با تابع تبدیلی ورودی را به خروجی ارتباط می‌دهد. دسته دوم، مدل‌های مفهومی است که براساس مطالعات محدود فرایندهای موجود در سامانه هیدرولوژی حوضه آبریز است. دسته سوم، مدل‌هایی با مبنای فیزیکی توزیعی هستند که در سال‌های اخیر مدل‌هایی با ماهیت نیمه توزیعی^۱ تهیه شده و اغلب در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه توزیعی، که در نقاط گوناگون جهان استفاده شده، مدل هیدرولوژیکی SWAT^۲ است (نظری پویا و همکاران، ۱۳۹۴:۱۰۰). مدل SWAT یک شبیه‌ساز هیدرولوژیکی و مدل زمان پیوسته و نیمه توزیعی مکانی با پایه فیزیکی است (نوری و همکاران، ۱۳۹۷:۷۷۵) که برای شبیه‌سازی فرایندهای - هیدرولوژیکی در

1. Semi distributed

2. Soil and Water Assessment Tool

حوضه‌های آبخیز وسیع با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب‌وهوایی در دوره‌های طولانی مدت کاربرد دارد. در شبیه‌سازی با مدل SWAT نقشه‌های کاربری اراضی یکی از موارد ضروری برای شبیه‌سازی و اجراکردن مدل است.

محققان فراوانی در داخل و خارج از کشور به ارزیابی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان رواناب توجه کرده‌اند که در ادامه، به برخی از این پژوهش‌ها اشاره شده است. رستمیان (۱۳۸۵) مدل SWAT را برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبخیز بهشت‌آباد از زیر حوضه‌های کارون شمالی به کار برد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده آن بود که SWAT رواناب را بهتر از رسوب شبیه‌سازی می‌کند. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب در بعضی از ماه‌ها به خوب شبیه‌سازی نکردن ذوب برف، فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع و آمار هواشناسی کوتاه‌مدت اشاره می‌شود. از علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب به شبیه‌سازی جریان، تعداد کم داده‌ها و صحت داده‌های رسوب و همچنین نبود پیوستگی اطلاعات رسوب توجه می‌شود؛ همچنین مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی جریان‌های حداکثر نیست. غفاری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی بیلان آبی، تأثیر هیدرولوژی را بر تغییر کاربری اراضی حوضه آبخیز زنجان رود طی ۴۰ سال اخیر ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده آن بود که تأثیرات جالب توجه تغییرات کاربری اراضی روی بار آبی و جریان رودخانه‌ای است. به طوری که تغییرات کاربری اراضی موجب افزایش مقدار رواناب سطحی حدود ۳۳ درصد و کاهش سطح سفره‌های آب زیرزمینی به میزان ۲۲ درصد شده است.

حاجی حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضه فرامرزی هلمند (افغانستان) طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۲ میلادی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و مدل شبیه‌ساز SWAT به بررسی دلایل کاهش جریان این رودخانه توجه کرده که تأثیر مستقیمی بر روند خشک‌شدن تالاب‌های بین‌المللی هامون داشته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که متوسط آورد سالیانه در شرایط اعمال تغییرات تدریجی کاربری اراضی مقدار $4/78$ (کیلومتر مربع) را دارد؛ در حالی که با حفظ کاربری ۱۹۹۰ و ۲۰۱۱ اجرای مجدد آن، به ترتیب متوسط آورد سالیانه $5/1$ و $4/28$ (کیلومتر مربع) را در سال سبب می‌شود. به عبارت دیگر، توسعه بخش کشاورزی در دشت هیرمند کاهش متوسط 800 میلیون مترمکعبی را در سال به همراه داشته است. مطلق و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر تغییر کاربری را بر رواناب رودخانه مارون در ایستگاه ایدنک با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل SWAT بررسی کردند. بدین منظور از شبیه‌سازی رواناب ماهانه، تحلیل حساسیت، بهینه‌سازی پارامترهای حساس، بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی طی چهار دهه اخیر بر کمیت و کیفیت رودخانه مارون در ایستگاه خروجی حوضه آبخیز مارون (ایدنک) در استان کهگیلویه و بویراحمد استفاده کرده‌اند. برای این مقصود از مدل نیمه توزیعی SWAT و برنامه SUFI2 و در قالب بسته نرم‌افزاری SWAT CUP برای تحلیل حساسیت، واسنجی، صحت‌سنجی و آنالیز نبود قطعیت بهره گرفته است. مقایسه اثر گزینه‌های مدیریتی کاربری اراضی بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی و همچنین مقادیر مختلف رواناب نشان‌دهنده آن است که سناریوی بدبینانه در منطقه اتفاق افتاده است. با ادامه روند تخریبی در کاربری اراضی به سمت حالت قهقرایی، مقادیر مختلف رواناب افزایش و نفوذپذیری و آبدگری به آبخوان‌های سطحی و عمیق کاهش می‌یابد.

لی^۱ و همکاران (2009) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی را روی هیدرولوژی سطحی (رواناب، تبخیر و تعرق) در حوضه آبخیز فلات لس چین ارزیابی کردند. آنها دریافتند که طی سال آماری 1981-2000 حدود ۴/۵ درصد از سطح حوضه تغییرات زیادی در تبدیل زمین‌های بوته‌زار و اراضی جنگلی پراکنده به مرتع با درجه متوسط و بالا داشته و اقلیم به سمت گرم‌شدن و خشک‌شدن پیش رفته است؛ همچنین در طول سال آماری 1980-1990 سهم تغییرات اقلیمی در کاهش رواناب به مراتب بیشتر از تغییر کاربری اراضی بوده است. فوهرر^۲ و همکاران (2002) با استفاده از GIS توزیع مکانی سناریوهای تغییر کاربری اراضی را مشخص کردند. سپس با مدل هیدرولوژیکی SWAT-G تأثیر این سناریوها را بر تعادل آبی حوضه آبخیز پیش‌بینی کردند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که با کاهش سطح جنگل‌ها، تبخیر و تعرق واقعی حوضه به مقدار ۵۰ میلی‌لیتر کم می‌شود که بخش کمی آن (۱۵ میلی‌متر) در تغذیه آب‌های زیر سطحی شرکت کرده و بخش اصلی آن (۳۵ میلی‌متر) به رواناب سطحی و جریان زیر قشری حوضه اضافه می‌شود؛ بنابراین باعث افزایش خطر بالقوه سیل در منطقه می‌شود.

کلین^۳ و همکاران (2013) در زیر حوضه کراالی هندوستان، توانمندی‌های مدل SWAT را در شبیه‌سازی رواناب بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل در شرایط آب‌وهوایی و تغییر کاربری اراضی توانایی زیادی در شبیه‌سازی و برآورد رواناب دارد. لی و همکاران (2007) در پژوهش (حوضه‌ای در غرب آفریقا) با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که تغییر کاربری حوضه‌ها از جنگل، مرتع و بوته‌زار به اراضی کشاورزی یا مناطق شهری سبب تغییر واکنش هیدرولوژی حوضه می‌شود. آنها به این نتیجه رسیدند که تغییر کاربری اراضی سبب افزایش در حجم سطحی، کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و آب پایه رودخانه‌ها و تغییر در مقدار روان آب و شدت فرسایش رسوب می‌شود. با توجه به مطالب فوق در این پژوهش، سعی بر آن است تا اثر تغییرات کاربری اراضی روی رواناب حوضه رودخانه قره‌چای که وسیع‌ترین حوضه آبخیز استان همدان است، براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی نوزده‌ساله و روند تغییرات با استفاده از مدل SWAT بررسی شود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه قره‌چای با مساحت حدود ۱۱۰۰۰ کیلومتر مربع (براساس مرز سیاسی)، وسیع‌ترین حوضه آبخیز استان همدان بوده و دارای مختصات جغرافیایی ۱۳° ۴۸' تا ۲۹° ۴۹' طول شرقی و ۱۲° ۳۴' تا ۴۴° ۳۵' عرض شمالی است و توسط رودخانه قره‌چای و شعبات فرعی آن زهکشی می‌شود (شایان و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۴۳). این حوضه، سیل‌خیزترین بخش استان همدان است که براساس آمار، وضعیت سه دشت همدان، کبودرآهنگ و رزن حادث‌تر از سایر مناطق است. طول رودخانه اصلی تا خروجی ایستگاه عمرآباد حدود ۲۷۰ کیلومتر و ارتفاع متوسط و شیب متوسط حوضه به ترتیب ۱۹۲۷ متر و ۶ درصد است.

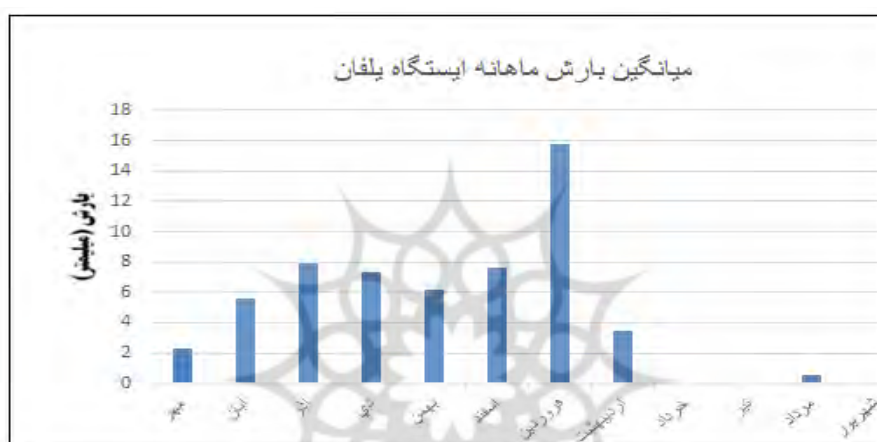
1. Li
2. Fohrer
3. Celine

این حوضه از قسمت جنوب غربی به دامنه‌های شمالی و شرقی رشته‌کوه زاگرس با حداکثر ارتفاع ۳۵۸۰ متر (قله الوند) از قسمت شمال غربی مشترک با مرز حوضه سفیدرود و از قسمت شمال و شمال شرقی به دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های آوج محدود و شامل شهرهای همدان، رزن، بهار، کبودرآهنگ، فامنین، قهاوند و اسدآباد است. از نظر وضعیت شبکه، آبراه‌های این حوضه دارای سه شاخه مهم منشعب از دامنه‌های شمالی رشته‌کوه الوند، آوج و آبراهه ورودی از سمت شرقی استان است. این رود پس از عبور از بخش شرا به جهت جنوب به شمال در حوالی روستای عمرو آباد به شاخه غربی قره‌چای می‌پیوندد. شاخه غربی از کوه‌های الوند همدان سرچشمه گرفته است و از به هم پیوستن شش رود کوچک به وجود می‌آید که در دشت رزن و بهار به نام سیمینه رود نامیده می‌شود. در دشت کبودرآهنگ شاخه فرعی زهتران خمیگان از شمال به جنوب جریان یافته که این رودخانه در انتهای بخش شرا با رودخانه فوق یکی شده است، به طرف ساوه جریان پیدا می‌کند، در ساوه نیز رود مزلقان (مزدقان) وارد قره‌چای شده است و پس از گذشتن از دشت ساوه به کویر نمک می‌ریزد.

از لحاظ خصوصیات اقلیمی متوسط میزان بارندگی طی دوره آماری ۴۰ ساله برابر ۲۵۳/۸ میلی‌متر است. در گرم‌ترین ماه سال میانگین حداکثر دمای هوای همدان به حدود ۳۴ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه سال این رقم به حدود ۲/۷ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در گرم‌ترین ماه سال میانگین کمترین دمای هوای همدان به ۱۴ درجه و در سردترین ماه سال این رقم به منهای ۹ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (دین پژوه ۱۳۸۹، ۲۷۰). میانگین سالانه دبی اندازه‌گیری شده برابر ۹/۷۷ متر مکعب در ثانیه مربوط به ایستگاه عمرآباد و نیز متوسط ارتفاع جریان ۲۱/۳ میلی‌متر است.

دشت کبودرآهنگ واقع در قسمت‌های مرکزی و غربی به علت شرایط فیزیوگرافی و خاک‌شناسی از مناطق مستعد جاری شدن سیل بوده است که سالیانه خسارات مالی و جانی فراوانی به روستاها و شهرهای آن وارد می‌شود. سه رودخانه اصلی لاله‌دان، شیرین‌سو و ایده‌لو به یکدیگر ملحق شده‌اند و در نهایت، از شهرستان کبودرآهنگ عبور می‌کنند. دشت‌های قهاوند و رزن نیز از دیگر نقاط سیل‌گیر این حوضه هستند.





شکل (۱) میانگین بیشترین و کمترین دما، کمترین دمای مطلق، بیشترین دمای مطلق و میانگین بارش ماهانه ایستگاه یلفان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (1) Average highest and lowest temperature, lowest absolute temperature, highest absolute temperature and average monthly rainfall of Yalfatan station (Source: Authors, 1401)

در حوضه‌های وسیع ندارد. چنین مدلی از اطلاعات ویژه‌ای شامل اقلیم، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی در حوضه برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند (نتیج و همکاران، ۲۰۰۵). اصلی‌ترین معادله در تجمیع رواناب معادله بیلان آب است. رواناب سطحی به روش شماره منحنی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیکی شبیه‌سازی و سرانجام کل رواناب برای حوضه روندیابی می‌شود که در ادامه، به اختصار توضیح داده شده است. روند کلی مراحل انجام پژوهش به صورت خلاصه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) نمودار جریان مراحل انجام مدل SWAT در پژوهش حاضر (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (3) Flow chart of SWAT model implementation steps in the current research (source: authors, 1401)

تهیه نقشه کاربری اراضی: کاربری اراضی، یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که مقادیر رواناب، تبخیر و تعرق و فرسایش سطحی حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر نیز با هدف استخراج کاربری اراضی حوضه آبخیز قره‌چای، ابتدا تصاویر ماهواره‌های لندست (OLI - TM) تهیه شد. برای به دست آوردن نتایج مقبول از تصاویر ماهواره‌ای، به منظور رسیدن به این نظر و رفع برخی خطاهای موجود در تصاویر، انجام مرحله پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای ضروری است که شامل تصحیحات هندسی و اتمسفری است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۴۱)؛ بنابراین به علت زمین مرجع بودن تصاویر مورد نیاز، تصحیحات اتمسفری روی تصاویر به روش FLAASH انجام شد. در این روش اتمسفر، مدل‌سازی و براساس مدل‌سازی انجام شده اثرات اتمسفر به کمترین رسانده شده است. برای اینکه دقت کافی در بحث محاسبات عددی حاصل شود، عملیات (RESCAAL) روی تصاویر تصحیح شده انجام شد تا ارزش عددی پیکسل‌ها، بین صفر و یک قرار بگیرد. در تصویر لندست ۸، برای افزایش دقت طبقه‌بندی روش تلفیق تصاویر چند طیفی^۱ با تصویر پنکروماتیک انجام یافته است و قدرت تفکیک مکانی به ۱۵ متر ارتقا یافت. در مرحله پردازش تصاویر با توجه به تنوع داده ماهواره‌ای و تفکیک‌پذیری طیفی آن در این پژوهش، طبقه‌بندی کاربری زمین به صورت شیء‌گرا در محیط نرم‌افزاری eCognition انجام شد. در پژوهش حاضر، از روش قطعه‌بندی مالتی رزولوشن^۲ استفاده که با روش آزمون و خطا سعی شد، بهترین ترکیب ضریب شکل و فشردگی و مقیاس اشیا انتخاب شود. در جدول (۱) مشخصات تصاویر استفاده شده نشان داده شده است.

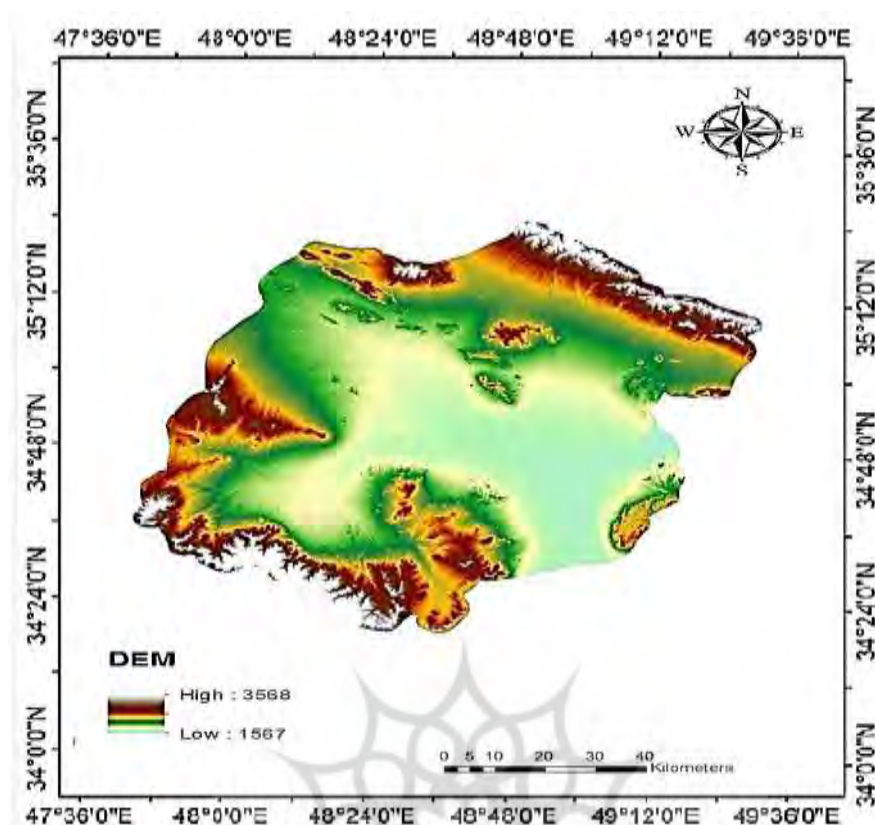
جدول (۱) مشخصات تصاویر اخذ شده (<https://earthexplorer.usgs.gov>) (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (1) Specifications of the obtained images (<https://earthexplorer.usgs.gov>)
(Source: Authors, 1401)

ردیف Row	ماهواره Sattelaït	سنجنده Sensor	تاریخ تصویر Image date	تعداد باندها Number of bans	قدرت تفکیک	تعداد تصاویر
۱	لندست ۵ Landsat5	TM	۲۰۰۱/۰۶/۰۱	۵	۳۰	۱
۲	لندست ۸ Landsat8	OLI	۲۰۲۰/۰۷/۱۲	۶	۳۰	۱

نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM): این نقشه به صورت GRID یا shp به مدل SWAT معرفی شد و نشان‌دهنده تغییرات ارتفاع در منطقه مورد مطالعه برحسب متر است. ابتدا لایه رقومی ارتفاع به صورت رستر به مدل فراخوان می‌شود تا مرز حوضه با استفاده از آن تعیین، با توجه به هدف کاربر، مرز زیر حوضه‌ها ترسیم و شبکه جریان رودها بارسازی شود. این نقشه به صورت درجه‌بندی شده یا شیپ فایل به مدل معرفی می‌شود و نشان‌دهنده تغییرات ارتفاع در حوضه برحسب متریک است.

1. multispectral
2. multi reselation



شکل (۴) نقشه DEM حوضه قره‌چای در استان همدان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (4) DEM map of Qara Chai basin in Hamadan province (source: authors, 1401)

ضریب کاپا: یک شاخص آماری است که از ماتریس خطا^۱ به دست می‌آید و صحت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی تصادفی بیان می‌کند. برای محاسبه این ضریب از رابطه زیر استفاده شد:

فرمول (۱):

$$Kapa = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_i \times x_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_i \times x_i)}$$

Xii: تعداد مشاهدات در ردیف i و ستون N؛ i: تعداد عناصر ماتریس خطا؛ xi: به ترتیب مجموع سطر i ام و ستون k؛ i: تعداد ردیف‌ها در ماتریس؛ kapa: دقت تصویر. در مواردی که مقایسه صحت طبقه‌بندی مورد توجه است، از ضریب کاپا استفاده می‌شود. دامنه کاپا بین صفر و یک است که عدد یک نشان‌دهنده همسویی صد درصد نقشه طبقه‌بندی شده با واقعیت زمینی است. ضریب کاپای بیش از ۰/۸ درصد نشان‌دهنده قوی و همسو بودن طبقه‌بندی با واقعیت زمینی است. اگر این مقدار بین ۰/۴ تا ۰/۸ باشد، یک طبقه‌بندی متوسط و کمتر از ۰/۴ نشان‌دهنده طبقه‌بندی ضعیف است (جلیلیان، ۱۳۹۷: ۴۰).

^۱ ماتریس خطا مجموعه‌ای از داده‌های مرجع است که با تصاویر داده‌شده مقایسه می‌شود.

داده‌های هیدرومتری: در مدل‌سازی با استفاده از مدل SWAT مانند سایر مدل‌های هیدرولوژیک لازم است که پس از شبیه‌سازی، مدل ساخته شده واسنجی و اعتبارسنجی شود. از جمله داده‌های مورد استفاده: آمار بلندمدت رواناب و رسوب^۱ اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه یا حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه است. برای شبیه‌سازی رواناب سطحی از روش شماره منحنی استفاده شده، این داده‌ها (نقشه کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاعی، داده‌های هیدرومتری، نقشه‌های خاکشناسی و داده‌های روزانه بارندگی) با توجه به گام‌های زمانی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (ماهانه) آماده شد. در این پژوهش از داده‌های بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ استفاده شده است.

جدول (۲) مختصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه قره‌چای استان همدان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

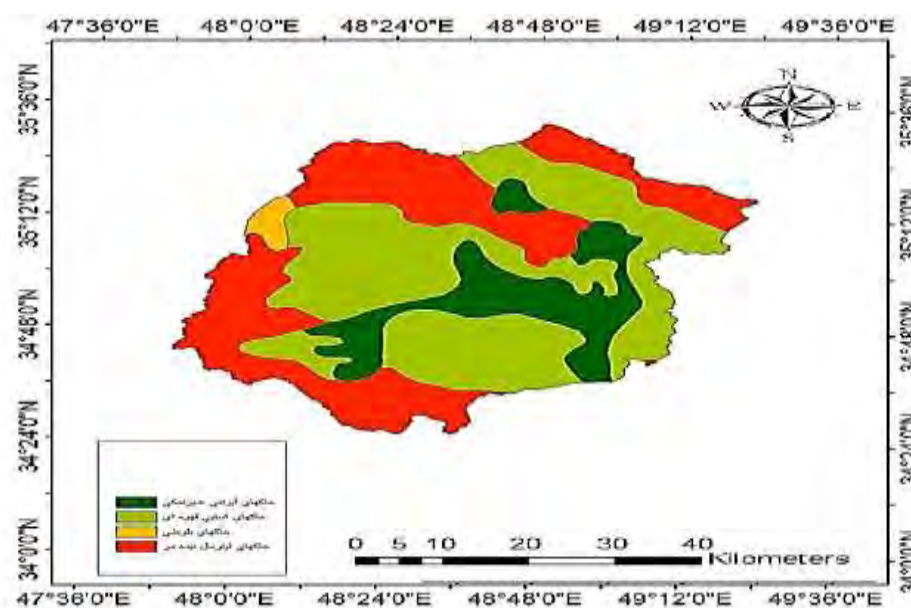
Table (2) coordinates of the hydrometric stations of Qara Chai basin in Hamadan province (source: authors, 1401)

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع ایستگاه (متر)	میانگین دبی سالانه (m ³ /s) دوره ۱۳۸۰-۱۳۹۹	انحراف معیار میانگین دبی سالانه (m ³ /s)
یلغان	۴۸/۳۶	۳۴/۴۳	۱۹۹۹	۱/۱۲۹	۰/۳۶۱
بهادریگ	۴۴/۶۰	۳۸/۶۶	۱۹۹۴	۰/۴۷۱	۰/۲۸۹
تقسیم آب	۴۸/۲۷	۳۴/۴۵	۲۰۸۸	۰/۴۵۹	۰/۲۱۳
توئینجین	۴۸/۴۶	۳۴/۸۲	۱۸۴۱	۰/۴۸۳	۰/۳۵۵
سیاه کمر	۴۷/۹۹	۳۴/۲۸	۱۷۵۷	۱/۱۶۶	۰/۵۴۲
قره اغاج	۴۵/۰۷	۳۸/۸۷	۲۰۴۷	۰/۰۸۷	۰/۰۰۹
کوشک آباد	۴۶/۹۹	۳۸/۶۳	۱۷/۲۵	۱/۱۲۳	۱/۳۰۹
سولان	۴۸/۴۶	۳۴/۸۲	۱۸۴۱	۰/۲۸۸	۰/۱۵۳
عباس آباد	۴۸/۲۷	۳۴/۴۵	۲۰۸۷	۰/۴۶۶	۰/۵۳۵
ابرو	۴۷/۴۵	۳۸/۴۲	۲۷۷۰	۰/۱۸۱	۰/۱۵۸
جگنلو	۴۸/۰۶	۳۴/۶۴	۱۸۰۲	۰/۲۱۸	۰/۱۳۰
قراکند	۴۸/۷۷	۳۵/۳۶	۱۷۶۲	۰/۴۰۲	۰/۲۱۸
قلعه جوق	۴۸/۶۳	۵۲/۳۵	۲۰۸۰	۰/۴۱۶	۰/۲۳۲
سوباتی	۴۸/۸۲	۳۴/۲۷	۱۷۷۳	۱/۱۰۸	۰/۵۲۱
زهران	۴۸/۴۰	۳۴/۰۲	۱۶۵۸	۰/۲۱۱	۰/۱۰۱
عمرآباد	۴۸/۶۸	۳۴/۲۰	۱۶۷۹	۰/۲۷۵	۰/۱۵۷
خمیگان	۴۸/۵۳	۳۴/۸۵	۱۷۴۹	۰/۲۴۵	۰/۱۳۲

نقشه خاکشناسی: اطلاعات خاکشناسی از اساسی‌ترین اطلاعات مورد نیاز مدل است. مدل SWAT خصوصیات مختلف فیزیکی - شیمیایی خاک از قبیل بافت خاک، درصد رطوبت در دسترس خاک، هدایت هیدرولیکی، چگالی حجمی، مقدار کربن آلی^۲ و ... برای مقدارهای مختلف خاک نیازمند است. داده‌های خاک، یک ورودی مهم برای هر مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی است (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۳). داده‌های خاک مورد نیاز این پژوهش از جهاد کشاورزی استان همدان تهیه شد. شکل (۵) نشان‌دهنده نقشه خاک حوضه قره‌چای است.

۱. برای برآورد رسوب در مدل SWAT از روابط مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (MUSLE) استفاده شد و واحد آن (تن) است.

2. Organic carbon



شکل (۵) نقشه خاک حوضه قره‌چای واقع در استان همدان (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (5) Soil map of Qara Chai basin located in Hamedan province (source: authors, 1401)

داده‌های روزانه بارندگی: داده‌های بارش اغلب به صورت نقطه‌ای در ایستگاه‌های باران‌سنجی ثبت می‌شوند. داده‌های موردنیاز بارش از بخش مطالعات آب منطقه‌ای استان همدان تهیه و برای این پژوهش از داده‌های بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ استفاده شده است.

جدول (۳) مختصات ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در پژوهش حاضر (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (3) coordinates of rain gauge stations used in the current research (source: authors, 1401)

ارتفاع ایستگاه (متر)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	نام ایستگاه
۱۹۵۷	۳۴/۷۶	۴۸/۶۰	اکباتان
۱۸۰۲	۳۴/۸۴	۴۶/۰۶	آغاچنابلاغی
۱۹۱۷	۳۴/۶۳	۴۷/۳۵	بابا پیرعلی
۱۷۸۳	۳۴/۵۵	۴۸/۶۰	تویسرکان
۱۸۷۰	۳۵/۳۵	۴۹/۰۶	درجزین
۱۸۴۱	۳۴/۸۲	۴۸/۴۶	سولان
۲۲۵۰	۳۵/۱۵	۴۸/۲۶	سوباشی
۱۷۶۲	۳۵/۳۶	۴۸/۷۷	قره آکند
۲۰۸۰	۵۲/۳۵	۴۸/۶۳	قلعه جوق
۱۷۰۲	۳۵/۰۳	۴۸/۵۵	کوشک آباد
۱۶۴۵	۳۴/۸۵	۴۸/۹۸	قه‌اوند
۱۸۰۵	۳۵/۳۵	۴۹/۰۱	رزن
۱۶۷۹	۳۴/۲۰	۴۸/۶۸	نوژه
۱۷۴۹	۳۴/۸۵	۴۸/۵۳	همدان (فرودگاه)

روابط شاخص‌های ارزیابی مدل SWAT روش‌های زیر برای ارزیابی مدل SWAT به کار گرفته شدند:

ضریب نش - ساتکلیف (NS)

اختلاف نسبی نشان‌دهنده مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است و به صورت زیر بیان می‌شود:
فرمول (۲):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mi} - \bar{Q}_m)^2}$$

که در آن، Q_{si} ، Q_{mi} ، \bar{Q}_m به ترتیب مقادیر رواناب شبیه‌سازی، رواناب اندازه‌گیری و میانگین مقادیر رواناب اندازه‌گیری شده هستند.

فاکتورهای R^2 ، P

اگر برای P ، مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ و برای R کمتر از ۱ باشند، مطلوب هستند. P به صورت زیر است:
فرمول (۳):

$$P - \text{factor} = \frac{N_{ob}}{N_T}$$

N_{ob} برابر داده مشاهده‌ای است که در محدوده ۹۵ درصد قطعیت‌نداشتن تخمین (۹۵ ppv) (حدود بالا و پایین ۹۵ppv برای هر داده مشاهده‌ای) قرار گرفته و N_T تعداد کل داده‌های مشاهده‌ای است. R نیز به صورت زیر است:
فرمول (۴):

$$R - \text{factor} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i$$

K تعداد نقاط مشاهده‌ای، X_U و X_L به ترتیب، حد پایین و بالای ۹۵ ppv و σ_x انحراف معیار متغیر اندازه‌گیری شده X هستند.

ضریب تبیین (R^2)

رابطه برآورد ضریب تبیین به صورت زیر است:
فرمول (۵):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})(Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{simav})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obsav})^2}$$

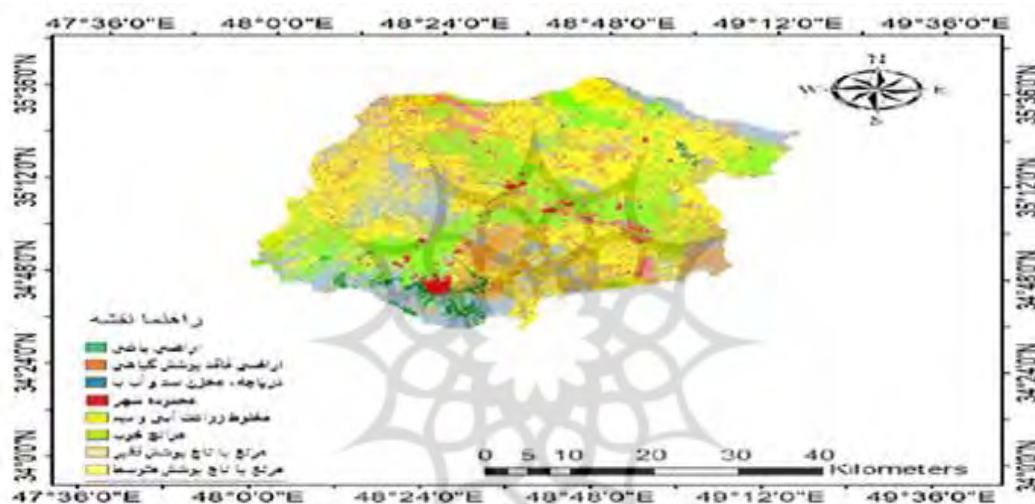
1. Nash-Sutcliffe Coefficient
2. Response modification factors
3. Deflection amplification factor
4. Coefficient of Determination

که در آن مقدار برآوردی بر نقطه i ام، Q_i^{sim} مقدار میانگین دبی برآوردی Q_i^{obs} مقدار مشاهده‌ای برای نقطه i ام، Q_i^{obsav} میانگین دبی مشاهداتی و n تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

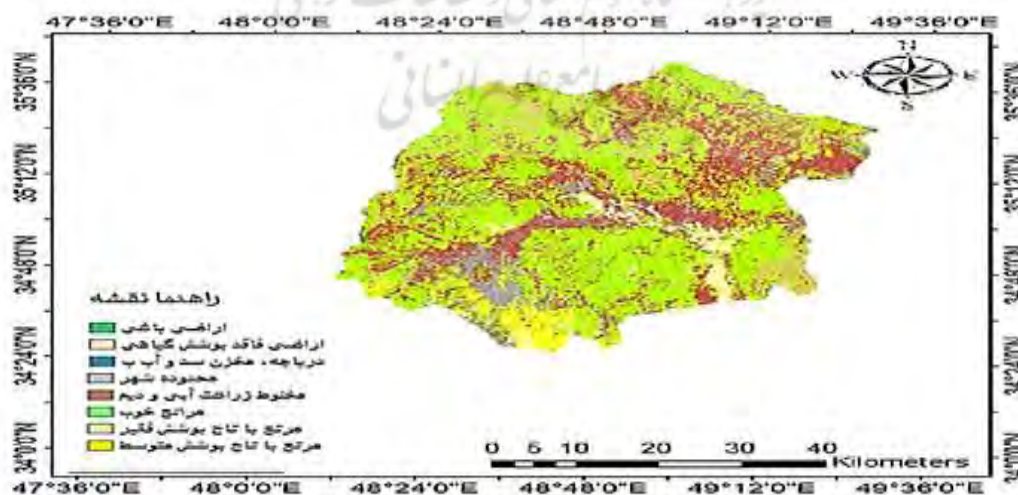
نتایج طبقه‌بندی کاربری اراضی

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب‌های سطحی در حوضه قره‌چای با استفاده از سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل SWAT اقدام شد. به همین منظور نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی محدوده قره‌چای برای سال‌های (۱۳۸۰-۱۳۹۹) تهیه شد. شکل‌های (۶ و ۷) نشان‌دهنده نقشه‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی مربوط به بازه زمانی مشخص شده هستند.



شکل (۶) کاربری اراضی در حوضه آبریز قره‌چای در سال ۱۳۸۰ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (6) land use in the Qara Chai catchment area in 2010 (source: authors, 2011)



شکل (۷) تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز قره‌چای در سال ۱۳۹۹ نسبت به سال ۱۳۸۰ (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (7) Land use changes in Qara Chai catchment area in 2019 compared to 2010 (source: authors, 2011)

صحت‌سنجی مدل

در این نقشه‌ها که کاربری اراضی حوضه آبخیز شامل ۸ نوع کاربری (اراضی باغی، اراضی فاقد پوشش گیاهی، دریاچه، محدوده شهر، مخلوط زراعت آبی، مراتع خوب، مراتع با تاج پوشش فقیر، مراتع با تاج پوشش متوسط) است، مرز زیر حوضه‌ها در محیط GIS مشخص و رقومی شد. در مقایسه نقشه‌های سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۹ تغییرات کاربری اراضی در برخی کلاس‌ها مشهود است. براساس این جدول در محدوده مورد مطالعه اراضی باغی و فاقد پوشش گیاهی به ترتیب با ۲۰۷/۹۹ و ۲۵۵۰ کیلومترمربع کاهش مواجه بوده است. این در حالی است که سطح دریاچه، مخزن، سد آب، محدوده شهر و مخلوط زراعت آبی و دیم به ترتیب با ۵۰/۷۵، ۹۵۰ و ۱۲۹۸/۵ (کیلومترمربع) نشان‌دهنده افزایش است؛ همچنین در جدول (۵) حاکی از تغییر مساحت کاربری‌های مختلف طی سال‌های مورد بررسی از طریق تصاویر ماهواره‌ای است. در اینجا روند افزایشی مساحت مراتع خوب با ۶۰۶/۶۵ (کیلومترمربع) همچنین روند نزولی، کاهش مرتع با تاج پوشش فقیر و متوسط با ۱۶/۶ و ۱۳۱/۳ (کیلومترمربع) طی دوره‌های مختلف مشاهده می‌شود. نتایج به دست آمده از جدول (۵) نشان‌دهنده آن است که در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ تغییرات زیادی مشاهده می‌شود که از عمده‌ترین این کاربری‌ها، به کاهش اراضی فاقد پوشش گیاهی اشاره می‌شود که به مرور مساحت خود را به دیگر کاربری‌ها همچون مناطق مسکونی و کشاورزی و دیمزار، اختصاص داده‌اند. به علاوه، کاربری مراتع با تاج پوشش فقیر و متوسط با گذشت زمان مساحتی رو به کاهش داشته و به مراتع خوب تبدیل شده است.

در جدول (۴) ماتریس خطای طبقه‌بندی کاربری اراضی به روش حداکثر احتمال آورده که در آن صحت کل و ضریب کاپا مشخص شده است. با توجه به نتایج ضریب کاپا با ۰/۹۰ درصد برای سال ۱۳۸۰ و ۰/۸۵ درصد برای سال ۱۳۹۹ چنین برمی‌آید که نتیجه در سطح مقبولی است.

جدول (۴) نتایج صحت‌سنجی خروجی تغییرات کاربری اراضی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (4) of the validation results of land use change output (sources: authors, 1401)

سال	صحت کل	ضریب کاپا
۱۳۸۰	۰/۸۷	۰/۹۰
۱۳۹۹	۰/۹۰	۰/۸۵

جدول (۵) نتایج مربوط به تغییر کاربری اراضی در حوضه رود قره‌چای استان همدان بین دو سال ۱۳۸۰ و ۱۳۹۹

(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

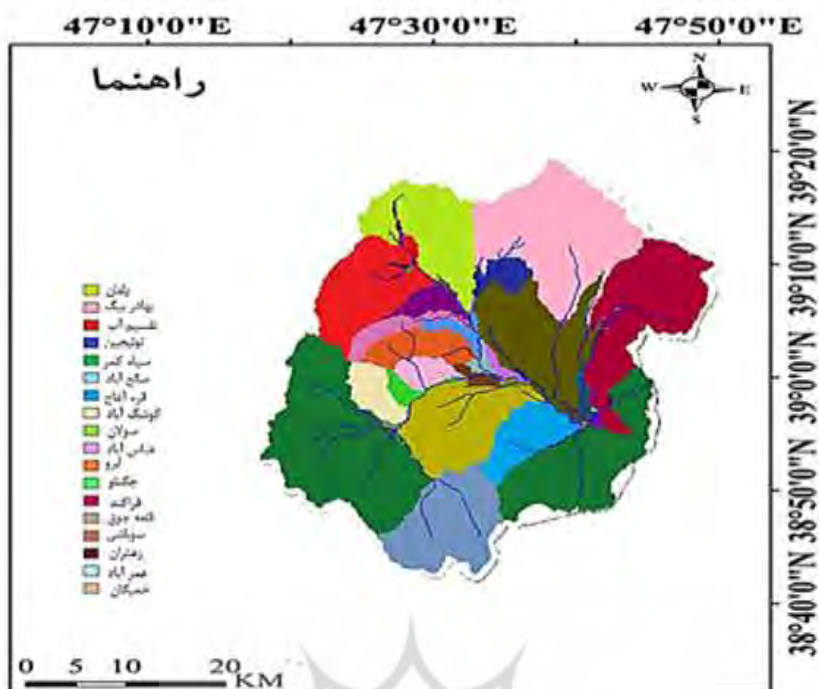
Table (5) results related to land use change in the Qara Chai river basin of Hamedan province between 2010 and 2019 (source: authors,1401)

نام کلاس	مساحت ۱۳۸۰ (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت ۱۳۹۹ (کیلومتر مربع)	درصد	تفاضل مساحت	روند تغییرات
اراضی باغی	۴۵۳/۱۱	۴/۱۱	۲۴۵/۱۲	۲/۲۲	-۲۰۷/۹۹	کاهشی
اراضی فاقد پوشش گیاهی	۴۹۹۷/۶	۴۵/۴۳	۲۴۴۷/۶	۲۲/۲۵	-۲۵۵۰	کاهشی
دریاچه، مخزن و سد آب	۳/۷۵	۰/۰۳	۵۴/۵	۰/۴۹	۵۰/۷۵	افزایشی
محدوده شهر	۸۳۶/۲۲	۷/۶۰	۱۷۸۶/۲۲	۱۶/۲۳	۹۵۰	افزایشی
مخلوط زراعت آبی و دیم	۳۲۹۸/۵	۲۹/۹۸	۴۵۹۷	۴۱/۷۹	۱۲۹۸/۵	افزایشی
مراعات خوب	۱۲۳۷/۴۶	۱۱/۲۴	۱۸۴۴/۱۱	۱۶/۷۶	۶۰۶/۶۵	افزایشی
مرتع با تاج پوشش فقیر	۲۶/۴	۰/۲۴	۹/۸	۰/۰۸	-۱۶/۶	کاهشی
مرتع با تاج پوشش متوسط	۱۴۶/۹۵	۱/۳۳	۱۵/۶۵	۰/۱۴	-۱۳۱/۳	کاهشی
مجموع	۱۱۰۰۰	۰/۱۰۰	۱۱۰۰۰	۰/۱۰۰	-	-

اجرای مدل SWAT

در طرح مورد مطالعه با بهره‌گرفتن از مدل SWAT حوضه آبریز قره‌چای با مساحت ۱۱۰۰۰ کیلومتر مربع به ۱۸ زیر حوضه تقسیم شد. در ادامه، برای ساخت واحدهای واکنش هیدرولوژی توسط مدل SWAT نقشه کاربری اراضی، خاک و شیب به صورت داده‌های رستری مجزا و جداگانه به مدل معرفی شدند. پس از معرفی دو نقشه کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب به مدل SWAT تمامی نقشه‌های رستر شده ترکیب و ادغام شدند تا واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژی حوضه تولید شود. منتهی به علت اینکه نقشه‌های کاربری اراضی در دو بازه زمانی دچار تغییر شده و ویژگی‌های متفاوتی را پیدا کرده‌اند، واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژی علاوه بر نوع خاک و شیب، متأثر از نوع کاربری نیز می‌شوند؛ بنابراین تعداد واحدهای عکس‌العمل هیدرولوژی تغییر می‌کند.

پس از تشکیل حوضه و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل SWAT به مدل معرفی شد. سپس خروجی این مدل با برنامه SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP مرتبط، پارامترهای مهم مدل SWAT برای حوضه آبخیز به کمک الگوریتم SUFI-2 در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ به روش یک پارامتر در هر بار، حساسیت سنجی، پارامترهای حساس‌تر مشخص و مقادیر بهینه آنها تعیین شد. به‌طور خلاصه مدل برای کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ و دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ و برای کاربری اراضی ۲۰۲۰ و دوره آماری ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ و اسنجی، برای دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ اعتبارسنجی، در ادامه، نتایج حاصله با استفاده از معیارهای آماری ضریب ناش ساتکلیف، ضریب تبیین p-factor و r-factor برای هر دو دوره اسنجی و اعتبارسنجی، تحلیل آماری شد و نتایج آماری آن با برنامه SWAT-CUP بررسی شد. در شکل (۷) ویژگی منطقه مورد مطالعه در خروجی مدل SWAT آورده شده است.



شکل (۸) نقشه منطقه مورد مطالعه در خروجی مدل SWAT (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (8) Map of the studied area in the SWAT model output (source: authors, 1401)

آنالیز حساسیت و واسنجی مدل SWAT

در این قسمت قبل از اینکه مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شود، نخست، با نرم‌افزار SWAT-CUP و اعمال تحلیل حساسیت، آماره‌هایی مشخص شدند که بیشترین تأثیر را بر میزان جریان حوضه آبخیز ایفا می‌کردند. به منظور واسنجی از الگوریتم SUFI2 در محیط SWAT-CUP استفاده شد. با توجه به اینکه تعداد پارامترهای قابل تغییر در مدل زیاد بودند، ابتدا در گام اول، پس از آماده‌سازی داده‌ها، آنالیز حساسیت انجام شد. آنالیز حساسیت برای تعیین اینکه یک مدل چقدر به تغییر مقدار امتیاز عاملی از آن و تغییر در ساختار مدل حساس است، انجام می‌شود. هدف اصلی از آنالیز حساسیت، تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام عامل همبستگی بیشتری با خروجی دارد. با انجام تحلیل حساسیت عوامل مهم و حساس شناخته و با تمرکز روی آنها واسنجی مدل سریع‌تر انجام می‌شود. برای انجام آنالیز حساسیت روش «یک پارامتر در هر بار»^۱ استفاده شد که متعارف‌ترین روش برای این کار است. نتایج تحلیل حساسیت انجام گرفته با استفاده از روش LH-OAT روی ۲۹ پارامتر بررسی و در نتیجه ۱۴ پارامتر به عنوان حساس‌ترین پارامترهای مؤثر بر حوضه آبخیز قره‌چای بر پایه زمانی ماهانه با نرم‌افزار SWAT-CUP مشخص شد که در جدول (۶) ارائه شده است. در این پژوهش آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص‌های t-stat و p-value در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP انجام گرفت.

جدول (۶) شاخص‌های نهایی انتخابی در واسنجی، میزان حساسیت آنها به همراه مقادیر بهینه در مدل SWAT (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (6) selected final indicators in calibration, their sensitivity along with the optimal value in the SWAT model (source: Authors, 1401)

رتبه حساسیت	مقادیر بهینه شاخص	کمترین	بیشترین	علامت اختصاری	شاخص
۱	۳/۶۵	۰/۰۰	۲۳/۲۹	V__SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب / متر (SLOPE)
۲	۲۴/۹۰	۱۸/۹۷	۲۵/۶۰	V__GW_DELAY.gw	زمان تأخیر تغذیه آب زیرزمینی / روز
۳	۰/۷۷	۰/۰۶۷	۰/۸۰	V__ALPHA_BF.gw	ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی
۴	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۲۲	V__TIMP.bsn	ضریب تأخیر دمای توده برف
۵	۲/۲۹	۱/۵۹	۲/۳۲	V__SFTMP.bsn	دمای وقوع برف / درجه سانتی‌گراد
۶	۱۴/۴۴	۱۱/۴۶	۲۰/۸۴	V__CH_K.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در کانال اصلی
۷	-۱/۰۰	-۱/۹۵	-۰/۹۲	R__SOL_AWC(..).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک / میلی‌متر در میلی‌متر
۸	-۰/۵۴	-۰/۶۳	-۰/۵۰	R__CN.mgt	شماره منحنی
۹	۱۰/۱۴	۱۰/۱۲	۱۱/۲۶	V__SMTMP.bsn	دمای ذوب توده برف / درجه سانتی‌گراد
۱۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	R__EPCO.bsn	ضریب تصحیح جذب آب از خاک توسط گیاه
۱۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۹	R__CH_N.rte	ضریب مانینگ
۱۲	۱/۹۶	۱/۰۳	۳/۹۴	V__SMFMN.bsn	عامل ذوب برف / درجه سانتی‌گراد
۱۳	۱/۳۸	۱/۳۶	۱/۳۹	R__SOL_K(..).sol	هدایت هیدرولیکی خاک / میلی‌متر بر ساعت
۱۴	۰/۳۷	-۰/۱۷	۰/۵۳	V__SURLAG.bsn	ضریب تأخیر روان آب سطحی

در مرحله واسنجی به واقعی کردن پارامترهای مختلف توجه و در نهایت، مقادیر بهینه پارامترها برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوضه آبخیز مورد مطالعه تعیین شد. علت آن چنین بیان می‌شود که از آنجایی که در حالت ماهانه مقدار متوسط ماهانه ارائه می‌شود، بسیاری از خطاهایی حذف می‌شود که ناشی از نوسان‌های روزانه است؛ همچنین واسنجی روزانه مدل SWAT به داده‌های روزانه فوق‌العاده زیادی نیاز دارد که در دسترس نبودند. در نتیجه واسنجی سالانه هم میزان دقت کمتری دارد؛ برای همین واسنجی ماهانه نشان‌دهنده نتایج بهتری است.

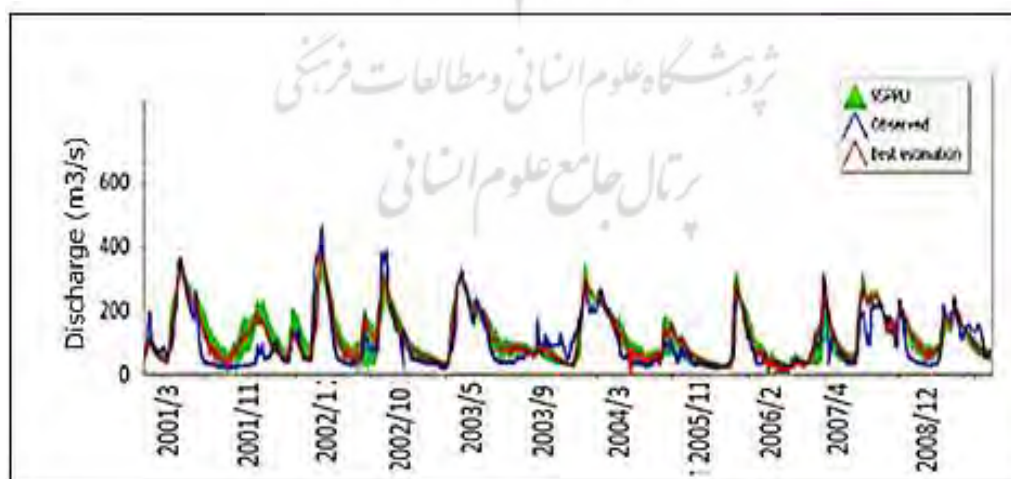
جدول (۷) مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز قره‌چای (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Table (7) the values of the model efficiency evaluation indices in simulating the runoff of the Qara Chai catchment basin (source: the authors, 1401)

سال 2020	سال 2001	نقشه کاربری اراضی	
2020-2013	2008-2001	دوره واسنجی	
۰/۷۲	۰/۷۷	R ²	نتایج واسنجی
۰/۸۲	۰/۷۶	NS	
۰/۷۲	۰/۹۰	P-Factor	
۰/۷۶	۰/۷۹	R-Factor	
2012-2009		دوره اعتبارسنجی	
	۰/۶۹	R ²	نتایج اعتبارسنجی
	۰/۶۳	NS	

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در نرم‌افزار SWAT-CUP

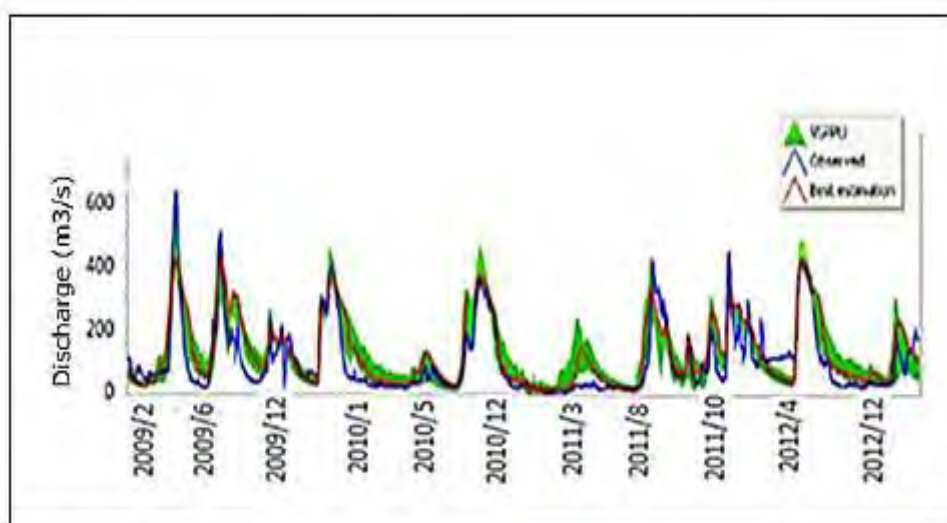
نتایج واسنجی مدل در دوره آماری 2001 تا 2008 و 2013 تا 2020 و همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل برای دوره آماری 2009 تا 2012 در جدول (۷) ارائه و از شاخص‌های ضریب تبیین و ضریب نش - ساتکلیف نیز برای سنجش قابلیت مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی بهره گرفته شده است. در SUFI2 آنالیز نبود قطعیت در مدل، پارامترها و ورودی‌ها با استفاده از ۹۵ درصد احتمال نبود قطعیت پیش‌بینی و مقادیر P-Factor و R-Factor تعریف می‌شود. رنگ سبز در شکل‌های (۹، ۱۰ و ۱۱) نشان‌دهنده احتمال نبود قطعیت است. مقادیر این معیارها در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۷) آمده و براساس این نتایج، مدل SWAT شبیه‌سازی مناسبی از رواناب در این حوضه ارائه کرده است.



شکل (۹) منحنی رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دوره واسنجی (2001-2008) در حوضه آبریز قره‌چای

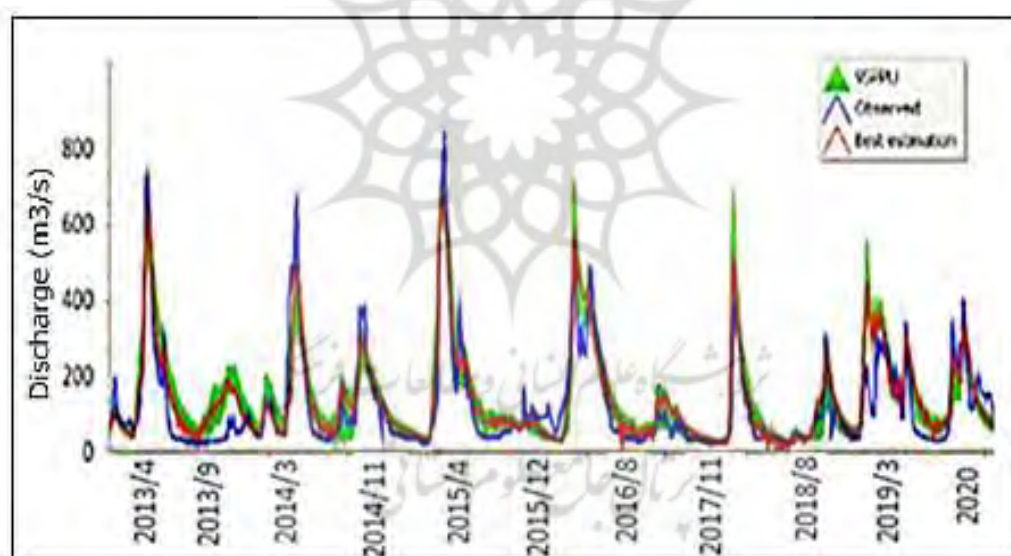
(منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (9) Relationship curve between simulated and observed runoff values during the calibration period (2001-2008) in the catchment area Qara Chai (source: authors, 1401)



شکل (۱۰) منحنی رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی اعتبارسنجی (2009-2012) در حوضه آبریز قره‌چای (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (10) Relationship curve between simulated runoff values and validation observations (2009-2012) in Qara Chai watershed (source: authors, 1401)



شکل (۱۱) منحنی رابطه بین مقادیر رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دوره واسنجی (2013-2020) در حوضه آبریز قره‌چای (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱)

Figure (11) the curve of the relationship between the simulated and observed runoff during the calibration period (2013-2020) in the Qarachai watershed (source, 1401)

با توجه به اینکه مدل SWAT برای آماده‌سازی نیازمند صرف وقت طولانی، اطلاعات آماری و شاخص‌های طبیعی بسیار زیاد است، به علت لحاظ کردن شرایط واقعی‌تر حوضه، کارایی مناسبی در شبیه‌سازی بسیاری از خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه دارد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تجزیه و تحلیل تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن روی رواناب حوضه قره‌چای با استفاده از مدل SWAT انجام شد. یکی از کاربردهای ویژه مدل SWAT بررسی تأثیر کاربری اراضی بر رواناب و توانایی بررسی مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی است. برای شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI-2 ابتدا با استفاده از تکنیک آنالیز حساسیت، پارامترهای مؤثر بر رواناب شناسایی شد. از میان ۲۹ پارامتر مورد بررسی در آنالیز حساسیت در نهایت، ۱۴ متغیر اثرگذار بر شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز قره‌چای مشخص شدند. با توجه به حساسیت مدل به پارامتر تلفات اولیه، واسنجی مدل براساس مقادیر تلفات اولیه انجام شد. سپس با استفاده از الگوریتم SUFI-2 اقدام به واسنجی و اعتبار سنجی مدل در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ شد. مقدار ناش ساتکلیف در شبیه‌سازی رواناب در محدوده مورد مطالعه مقبول بوده و مقدار p -factor (۰/۹۰) برای دوره واسنجی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ و ۰/۷۲ برای دوره واسنجی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰) حاکی از قابلیت زیاد مدل در شبیه‌سازی رواناب است. این امر نشان‌دهنده درصد قرارگیری داده‌های مشاهداتی بیشتری در باند فقدان قطعیت است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی در این مرحله، حاکی از این است که مدل SWAT برای مدل‌سازی ارائه‌شده به‌منظور مدیریت رواناب حوضه آبخیز قره‌چای استفاده می‌شود. برای سنجش دخالت تغییر کاربری اراضی بر میزان رواناب، دو مدل SWAT با استفاده از دو نقشه کاربری اراضی مجزا شامل کاربری اراضی سال ۲۰۰۱ و سال ۲۰۲۰ برای حوضه آبریز قره‌چای تهیه شد. نتایج مربوط به تغییرات کاربری اراضی از سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ نشان‌دهنده آن است که بیشترین تغییرات در کاربری اراضی شامل تغییرات مربوط به اراضی فاقد پوشش گیاهی با ۲۵۵۰ کیلومتر مربع و مخلوط زراعت آبی و دیم با ۱۲۹۸/۵ کیلومتر مربع است که این تغییرات در اراضی فاقد پوشش گیاهی، کاهشی و در اراضی مربوط به مخلوط زراعت آبی و دیم افزایشی بوده است؛ همچنین کمترین تغییرات مربوط به مرتع با تاج پوشش فقیر است که کمترین تغییرات را با ۱۶/۶ کیلومتر مربع داشته است؛ همان‌طور که خسروی (۱۳۸۹) در مطالعات خود روی سد شیخ بشارت (بیجار، کردستان) متوجه شد که به علت تغییرات کاربری اراضی و تخریب مراتع حوزه، دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب روند افزایشی داشته است. به‌علاوه، مشخص شد که با افزایش دوره بازگشت سیلاب، اثرات پوشش گیاهی کاسته و نقش پوشش گیاهی در کاهش سیلاب‌های با دوره بازگشت بالا کمتر می‌شود. مرادی (۱۳۹۴) در پژوهش خود برای بررسی تغییرات کاربری اراضی به این نتیجه رسید که تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ موجب افزایش رواناب سطحی و افزایش غلظت رسوب به میزان ۲ (تن در هکتار) در سال شده است. نتایج پژوهش شفيعی مطلق و همکاران (۱۳۹۷) نشان‌دهنده آن است که مقایسه اثر گزینه‌های مدیریتی کاربری اراضی بر مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی و مقادیر مختلف رواناب حاکی از آن است که سناریوی بدبینانه در منطقه اتفاق افتاده و با ادامه روند تخریبی در کاربری اراضی به‌سمت حالت قهقرایی، مقادیر مختلف رواناب افزایش و نفوذپذیری و آب‌گذری به آبخوان‌های سطحی و عمیق کاهش می‌یابد. صفری‌پور (۱۳۹۶) در بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر سیل‌خیزی رودخانه گل‌گل (ایلام) به این نتایج دست یافت که در سناریوی تغییر کاربری اراضی

خوش‌بینانه، که با بهبود وضعیت پوشش گیاهی همراه است، دبی اوج کاهش یافته و در سناریوی بدبینانه که با تضعیف وضعیت پوشش گیاهی همراه است، دبی اوج سیلاب افزایش می‌یابد؛ در نتیجه تخریب پوشش گیاهی باعث افزایش دبی اوج سیلاب می‌شود. بلواسی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعات خود روی رودخانه کهمان (لرستان) بیان کرده‌اند که تغییرات کاربری اراضی بر روند مورفولوژیکی رودخانه مؤثر بوده است و اهمیت بسزایی دارد. همچنین نتایج این پژوهش نشان‌دهنده آن بود که استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و تلفیق تصاویر در استخراج کاربری اراضی، کمک چشمگیری در بررسی دقیق تغییرات کاربری اراضی روی رواناب و شبیه‌سازی توسط مدل SWAT داشته است. استفاده از مدل SWAT، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت اراضی و رواناب است؛ همچنین استفاده از مدل‌های بارش-رواناب (مانند SWAT) به دلیل کاهش هزینه مطالعات میدانی، ممکن است اقتصادی باشد. از پیشنهاد‌های این پژوهش، این است که تغییر کاربری اراضی یکی از عوامل مهم در هیدرولوژی حوضه آبخیز است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود، تأثیر آن بر دیگر پارامترهای حوضه بررسی شود. با توجه به اینکه این پژوهش در گام زمانی ماهانه صورت گرفته است، پیشنهاد می‌شود در صورت توان سیستم رایانه‌ای، پژوهش حاضر در گام زمانی روزانه نیز اجرا تا مشخص شود که آیا در تمام گام‌های زمانی نتایج مقبولی به دست می‌آید یا نه.

منابع

- ابراهیمی، حمید، رسولی، علی‌اکبر، احمدپور، احمد (۱۳۹۷). مدل‌سازی تغییرات دینامیک کاربری اراضی با استفاده از پردازش شیء‌گرا تصاویر ماهواره‌ای و مدل زنجیره مارکوف مطالعه موردی: شهر شیراز، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره بیست و هفتم، شماره ۱۰۸، صص ۱۴۹-۱۳۷.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، آقایی، لیا، پیروزی، الناز (۱۳۹۶). بررسی تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر فرسایش با استفاده از RS و GIS (مطالعه موردی: شهرستان نیر)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۴، صص ۶۳-۴۹.
- اصغری سراسکانرود، صیاد، فعال نذیری، مهدی (۱۳۹۹). تحلیل تأثیر کاربری اراضی بر نتایج شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز نیرچای با استفاده از مدل SWAT، مجله مهندسی منابع آب، سال سیزدهم، شماره سوم، صص ۸۴-۶۹.
- بلواسی، ایمان علی، اصغری سراسکانرود، صیاد، اسفندیاری درآباد، فریبا، زینالی، بتول (۱۳۹۹). نقش تغییرات کاربری اراضی بر ویژگی‌های رواناب و سیل‌خیزی در حوضه آبریز دوآب، اکوهیدرولوژی، دوره ۷، شماره ۲، صص ۳۴۴-۳۳۱.
- حاجی حسینی، محمدرضا، حاجی حسینی، حمیدرضا، مرید، سعید، دلاور، مجید (۱۳۹۴). بررسی تغییرات کاربری اراضی بر رواناب حوضه فرامرزی هلمند طی دوره ۱۹۹۰ لغایت ۲۰۱۲ میلادی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و مدل شبیه‌ساز، تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۱، صص ۸۶-۷۳.

- جلیلیان، روح‌الله (۱۳۹۷). پایش تغییرات اراضی حاشیه و عرض رودخانه گاماسیاب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (استان کرمانشاه، شهرستان صحنه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، اصغری سرسکانرود، دانشگاه اردبیل، رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، ۱۵۷.
- خسروی، مهین، (۱۳۸۹)، بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر روی هیدروگراف سیلاب در حوضه آبخیز سد شیخ بشارت با استفاده از مدل HEC-HMS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مقدم نیا، علیرضا، پهلوانروی، دانشگاه زابل، گروه بیابان‌زدایی، ص ۱۹۳.
- دین پژوه، یعقوب (۱۳۸۹). تجزیه و تحلیل روند تغییرات زمانی تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه همدان). فضای جغرافیایی، سال ۱۱ شماره ۳۴، صص ۲۸۶-۲۶۰.
- رستمیان، رخساره (۱۳۸۵). تخمین رواناب و رسوب در حوضه بهشت‌آباد در کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT2000. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، حیدر پور، منوچهر، موسوی، فرهاد، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه مهندسی آب، ص ۱۵۵.
- شایان، سیاوش، یمانی، مجتبی، یادگاری، منیژه (۱۳۹۵). پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان، هیدروژئومورفولوژی، شماره ۹، صص ۱۵۸-۱۳۹.
- شفیعی مطلق، خسرو، پرهمت، جهانگیر، صدقی، حسین، حسینی، مجید (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر کاربری بر رواناب رودخانه مارون در ایستگاه ایدنک با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل SWAT، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ۷، شماره ۳، صص ۸۷-۷۱.
- صفری پور، پیمان، (۱۳۹۶). کاربرد GIS و RS در ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر سیل‌خیزی در حوضه آبریز گل‌گل ایلام با استفاده از مدل HEC-HMS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، حجازی، اسدالله، دانشگاه تبریز، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، ص ۱۴۴.
- غفاری، گل‌اله، قدوسی، جمال، احمدی، حسن (۱۳۸۸). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پاسخ‌های هیدرولوژی حوضه آبخیز: مطالعه موردی حوضه آبخیز زنجانرود. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، شماره ۱۶، صص ۱۸۰-۱۶۳.
- فاضلی فارسانی، آرش، قضاوی، رضا (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب‌های سطحی با استفاده از مدل SWAT. نشریه پژوهش‌های حفاظت از آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۶، صص ۲۰۶-۱۹۱.
- فیضی زاده، بختیار، پیرنظر، مجتبی، زندکریمی، آرش، عابدی قشلاقی، حسن (۱۳۹۳). ارزیابی کاربرد الگوریتم‌های فازی در افزایش دقت نقشه‌های کاربری اراضی استخراج‌شده با روش‌های پردازش شیء‌گرا، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، دوره بیست و چهارم، شماره ۹۴، صص ۱۱۳-۱۰۷.

مرادی، ایوب (۱۳۹۴). بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی روی دبی و بار معلق آبخیز گالیکش استان گلستان با استفاده از مدل SWAT، کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، نجفی نژاد، علیرضا، گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

نظری پویا، هادی، کردوانی، پرویز، فرجی راد، عبدالرضا (۱۳۹۴). واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی IHACRES و SWAT در شبیه‌سازی رواناب، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۲، شماره ۲، صص ۹۹-۹۱۱۲.

نوری، حمید، ایلدرمی، علیرضا، نادری، مهین، آقا بیگی امین، سهیلا (۱۳۹۷). مقایسه اثر تغییر کاربری اراضی و اقلیم بر رواناب یک حوضه آبخیز کوچک کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرین)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۰، شماره ۴، صص ۷۷۵-۷۹۰.

- Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (2011). Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 102(4), 271-279.
- Chen, Y., Xu, Y., & Yin, Y. (2009). Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiao basin, China. *Quaternary International*, 208(1-2), 121-128.
- De Andrade Farias, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., de Assunção Montenegro, A. A., de Sousa Lima, J. R., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2020). Modeling runoff response to land-use changes using the SWAT model in the Mundaú watershed, Brazil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(2), 194-206.
- Ewen, J., & Parkin, G. (1996). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. *Method. Journal of Hydrology*, 175(1-4), 583-594.
- Fohrer, N., Steiner, N., & Moller, D. (2002). Multidisciplinary Trade-off Function for Land Use Option in Low Mountain Ranges Area: A Modelling Approach. *Third International Conference on Water Resources and Environment Research*. Dresden University of Technology, 387-391.
- George, C., & James, E. J. (2013). Simulation of streamflow using soil and water assessment tool (SWAT) in Meenachil river basin of Kerala, India. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 1(2), 68-77.
- Howarth, P. J., & Wickware, G. M. (1981). Procedures for change detection using Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(3), 277-291.
- Koneti, S., Sunkara, S. L., & Roy, P. S. (2018). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Godavari River Basin using the HEC-HMS model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6), 206.
- Li, K. Y., Coe, M. T., Ramankutty, N., & De Jong, R. (2007). Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 258-268.
- Li, Z., Liu, W. Z., Zhang, X. C., & Zheng, F. L. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 35-42.
- Melesse, A. M., & Shih, S. F. (2002). Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 173-183.
- 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.
- Taia, S., Erraioui, L., Mbrenge, N. C., Chao, J., El Mansouri, B., Haida, S., & Taj-Eddine, K. (2021). Assessment of soil erosion using two spatial approaches: RUSLE and SWAT Model. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 234, p. 00082). EDP Sciences.
- Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J. M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 447-457.