

Investigating and analyzing the effect of climate change on the runoff and sediment using SWAT model (Case study: Ferizi Watershed)

Elahe Sheikhrودي¹ , Ali Golkarian^{2*} , Azar Zarrin³ , Alireza Rashki⁴ 

¹ M.Sc. Student, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Arid and Desert Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Extended Abstract

Introduction

Climate change has become a concern among the scientific community, governments, and the public. Climate change will inevitably affect the temporal and spatial distribution of the hydrological cycle and water resources. These changes, in turn, may lead to changes in soil erosion in watersheds, among other environmental problems. Evaluating changes in runoff and sediment performance in the context of climate change and showing the relationships between climate change and hydrological resources and ecological change can provide a scientific basis for the design, use, and management of water resource systems. Temperature changes and precipitation patterns can be predicted by regional climate models (RCM) and global climate models (GCM), which can have a distinct effect on water resources and soil erosion. In some cases, climate change can lead to changes in the amount, intensity, and distribution of rainfall. These changes, such as altering precipitation characteristics, increasing temperature, and reducing water resources have been extensively studied worldwide. Evaluating these impacts on hydrological and ecological systems can provide a scientific basis for the design, use, and management of water resource systems. Therefore, the current research was carried out to investigate the impact of climate change on the runoff and sediment of the Ferizi Watershed located in Razavi Khorasan Province.

Materials and Methods

This research has been done in two main steps. In the first step, the climate of the region was studied. First, the meteorological data of the region, including the minimum and maximum temperature and daily rainfall, were obtained from the Meteorological Organization. To investigate the climate change of the region using atmospheric general circulation models and the sixth IPCC report, the minimum and maximum temperature and daily precipitation for the period 2021-2100 were predicted using the SSP2-4.5 scenario (moderate) and the SSP5-8.5 scenario (very pessimistic). The second step is the application of the SWAT model for simulating past and future runoff and sediment patterns. For this purpose, first, the SWAT model was run using the data of the study area, such as the digital elevation model map, soil characteristics map, land use map, and meteorological data, and then using the observed runoff and sediment from the area and SUFI-2 algorithm in the SWAT-CUP software was calibrated. Finally, the SWAT calibrated model was run with forecasted precipitation and temperature data until the year 2100 and the impact of climate change on runoff and sediment was investigated.

Results and Discussion

The results of SWAT model calibration showed that the Nash-Sutcliffe criterion for discharge and monthly sediment in the calibration period was 0.66 and 0.65, respectively, while for the validation period, it was 0.57 and 0.56, respectively. The results of runoff and sediment from the simulation of the SWAT model under future climate conditions with two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 showed that the average runoff in these two scenarios were estimated to be 0.25 and 0.28 m³ s⁻¹, respectively, which shows a 48.9 % reduction in runoff. In the SSP2-4.5

scenario and a 42.8 % reduction of runoff in the SSP5-8.5 scenario compared to the previous period. Also, the total sediment for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios is predicted to be 3.57 and 4.94×10^6 ton, respectively, which shows a 7.2% increase in sediment in the SSP2-4.5 scenario and a 48.3 % increase in the sediment in the SSP5-8.5 scenario compared to the previous period. Also the average runoff and total sediment in the pessimistic scenario (SSP5-8.5) were predicted higher than the average scenario (SSP2-4.5). The total average precipitation in the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios is 266.1 and 281.4 mm y^{-1} , respectively, and the average temperature in the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios is 18.4 and 19.3 °C, respectively. Therefore, the reason for the increase in runoff and sedimentation in the pessimistic scenario compared to the average scenario is the higher amount of precipitation in the pessimistic scenario.

Conclusion

The investigations carried out in this research show that in general, runoff and sediment will decrease between 2021 and 2100 compared to the previous period, and the amount of reduction in the very pessimistic scenario (SSP5-8.5) will be higher than the average scenario (SSP2-4.5). This result, attributed to a relative reduction in rainfall and an increase in temperature, can be linked to extreme rainfall events projected for future years. Considering the increase in flood conditions in the basin and the increase in the amount of sediment load on the horizon of 2100, to deal with and adapt to climate change, it is better to take appropriate solutions in the Ferizi Watershed.

Keywords: Precipitation, Sediment production, Soil erosion, Temperature, Water and soil protection.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to thank the Regional Water Company of Khorasan Razavi Province and the Meteorological Organization for providing the information required for this study, which was extracted from a M.Sc. Thesis.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the writing and publication of the materials and results of this research.

Data availability statement

All information and results are presented in the article.

Authors' contribution

Elaheh Sheikh Roudi: Conceptualization, software modeling, writing the first version of the article; **Ali Golkarian:** Guidance, editing and reviewing the article, controlling the results; **Azar Zarrin:** Consulting, reviewing the text of the article, guidance; **Alireza Rashki:** Consulting, guidance.

*Corresponding Author, E-mail: golkarian@um.ac.ir

Citation: Sheikhoordi, E., Golkariann, A., Zarrin, A., & Rashki, A. (2024). Investigating and analyzing the effect of climate change on the runoff and sediment using SWAT model (Case study: Ferizi Watershed). *Water and Soil Management and Modeling*, 4(4), 283-298..

DOI: 10.22098/mmws.2023.13722.1361

Received: 22 September 2023, Received in revised form: 14 November 2023, Accepted: 14 November 2023, Published online: 14 November 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 283-298

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





بررسی و تحلیل اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز فریزی)

الهه شیخ‌رودی^۱، علی گلکاریان^{۲*}، آذر زرین^۳ و علیرضا راشکی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۳ دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۴ دانشیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

تغییر اقلیم به یک نگرانی در بین جامعه علمی، دولت‌ها و مردم تبدیل شده است. تغییر اقلیمی به ناچار چرخه هیدرولوژیکی و توزیع زمانی و مکانی منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تغییرات، به نوبه خود، ممکن است منجر به تغییر فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز همراه با سایر مشکلات محیط زیستی شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوزه آبخیز فریزی واقع در استان خراسان رضوی انجام شد. بدین منظور، ابتدا مدل SWAT با اطلاعات مورد نیاز از حوزه آبخیز مورد مطالعه و داده‌های رواناب و رسوب واسنجی شد و سپس شبیه‌سازی‌ها با مدل واسنجی شده انجام گرفت. برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر فرسایش حوزه آبخیز مورد مطالعه برای دوره آینده (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) از خروجی مدل اقلیمی MPI-ESM1-2HR مربوط به فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) و دو سناریوی انتشار متوسط و خیلی بدبینانه استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان رواناب در دوره آینده کاهش و میزان رسوب افزایش خواهد یافت. میانگین رواناب شبیه‌سازی شده تحت شرایط اقلیم آینده با دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است که نشان‌دهنده کاهش ۴۸/۹ درصدی رواناب در سناریوی SSP2-4.5 و کاهش ۴۲/۸ درصدی رواناب در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته است. همچنین، مجموع رسوب برای سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۳/۵۷ و ۴/۹۴ میلیون تن پیش‌بینی شده است که نشان‌دهنده افزایش ۷/۲ درصدی رسوب در سناریوی SSP2-4.5 و افزایش ۴۸/۳ درصدی رسوب در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته می‌باشد. در نهایت، میانگین رواناب و مجموع رسوب شبیه‌سازی شده در سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) بیش‌تر از میزان پیش‌بینی شده با سناریوی متوسط (SSP2-4.5) است.

واژه‌های کلیدی: بارش، تولید رسوب، حفاظت آب‌و خاک، دما، فرسایش خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: golkarian@um.ac.ir

استناد: شیخ‌رودی، الهه، گلکاریان، علی، زرین، آذر، و راشکی، علیرضا (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل اثر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوزه آبخیز فریزی). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۲۹۸-۲۸۳.
DOI: 10.22098/mmws.2023.13722.1361

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۲۸۳ تا ۲۹۸

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خاک از مهم‌ترین منابع تأمین غذا و امنیت جوامع است. فرآیند تشکیل خاک زمان‌بر بوده درحالی‌که تخریب آن بسیار سریع انجام می‌شود. به همین دلیل خاک را منبعی تجدیدناپذیر به‌شمار آورده‌اند و حفظ و نگهداری آن بسیار مهم و ضروری است (Paroissein et al., 2015). عوامل بسیار زیادی در روند تخریب خاک مؤثر واقع می‌شوند که از مهم‌ترین آن عوامل می‌توان فرسایش خاک^۱ را نام برد که تحت تأثیر تغییرات جهانی است. در طی دهه‌های گذشته، فرسایش خاک به‌دلیل تخریب تدریجی منابع طبیعی و اثراتی که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم داشته است، به یک مسأله جهانی تبدیل شده است. هم‌چنین، عوامل مختلف دیگر مانند فعالیت‌های نامناسب کشاورزی، قطع بی‌رویه جنگل‌ها و آتش‌سوزی، چرای بیش از اندازه و فعالیت‌های انسانی، اراضی بیش‌تری را در معرض فرسایش قرار داده و موجب شده است که تخریب آن‌ها شدت بیش‌تری داشته باشد (Terranova, 2009). فرسایش خاک فرآیندی طبیعی است که به‌وسیله عوامل مختلف کنترل می‌شود. عوامل طبیعی و انسانی باعث ایجاد دو مفهوم توان پتانسیل خطر و شدت فرسایش خاک شده‌اند. پتانسیل خطر فرسایش دو عامل خاک و اقلیم که همان فرساینده‌گی و فرسایش‌پذیری هستند را شامل می‌شود. ولی شدت فرسایش به تأثیرگذاری همه عوامل مربوط است (Arab, 2017). مهم‌ترین علت بالقوه فرسایش خاک به شرایط اقلیمی و تغییرات ناشی از آن در منطقه مربوط است (Litschert et al., 2014).

تغییرات اقلیمی باعث تغییر در میزان رطوبت، بارش و جریان‌های جوی شده و به‌طور کلی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Plangoen et al., 2013). تغییرات دمایی از اثرات واضح و روشن و قابل اندازه‌گیری تغییر اقلیم است و باعث افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت جو می‌شود. به‌طوری‌که با هر درجه افزایش دما هفت درصد به ظرفیت نگهداری رطوبت جو اضافه می‌شود (IPCC, 2007). تغییر در بیلان آبی که ناشی از تغییرات اقلیمی است بسیاری از فرآیندهای زمینی مانند فرسایش، پایداری شیب، تغییر کانال و انتقال رسوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mukundan et al., 2013). تغییرات دمایی و الگوهای بارش می‌تواند توسط مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM^۲) و جهانی (GCM^۳) پیش‌نگری شود. تغییرات دمایی و الگوهای بارش می‌تواند تأثیر متمایزی بر منابع آب و فرسایش خاک داشته باشد (Field and Barros, 2014; Mullan et al., 2012). تغییرات اقلیمی در بعضی موارد می‌تواند منجر به ایجاد تغییر در میزان، شدت و پراکنش بارندگی‌ها شده، علاوه‌بر تأثیر بر منابع آب، موجب افزایش میزان فرسایش شود (Ghazavi et al., 2018). کاهش بارش، افزایش دما و کاهش منابع آبی از

جزمله این اثرات است که در مطالعات مختلف به آن اشاره شده است (Fallah Kalaki et al., 2021; Sharafati et al., 2020). این تغییرات آب و هوایی می‌تواند اثرات متنوعی بر کارکرد حوزه‌های آبخیز کشور داشته باشد. ارزیابی تغییرات در رواناب و عملکرد رسوب در چارچوب تغییرات اقلیمی و نشان دادن روابط بین تغییرات اقلیمی و منابع هیدرولوژیکی و تغییر اکولوژیکی می‌تواند یک مبنای علمی برای طراحی، استفاده و مدیریت سامانه‌های منابع آب فراهم کند و به تلاش‌های مربوط به حفظ آب و خاک در مقیاس حوزه آبخیز بیش‌تر کمک کند. این مطالعه روابط بین تغییرات اقلیمی و میزان رواناب و رسوب در حوزه آبخیز فریزی را بررسی می‌کند.

برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر فرسایش خاک پژوهش‌های زیادی انجام شده است. به‌عنوان نمونه، Zhang and Nearing (2005) گزارش دادند که تغییر در میانگین بارش و دمای سالانه در اوکلاهامای مرکزی باعث ایجاد تغییرات قابل توجه در رواناب و فرسایش خاک می‌شود. در ادامه، Routschek et al. (2014) تغییرات نرخ فرسایش خاک را بر اساس سناریوی A1B IPCC در آلمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی منجر به افزایش قابل توجهی در از بین رفتن خاک تا سال ۲۰۵۰ و کاهش جزئی تا سال ۲۱۰۰ خواهد شد. در مطالعه‌ای، Shrestha and Wang (2018) با استفاده از SWAT به پیش‌بینی میزان رسوب با در نظر گرفتن شرایط تغییر اقلیم رودخانه آتاباسکا در آلبرتا کانادا پرداختند. آن‌ها داده‌های اقلیمی آینده را با دو سناریوی انتشار شامل RCP 4.5 و RCP 8.5 شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان‌دهنده افزایش فرسایش خاک و انتقال رسوب در آینده بوده است. در دسترس بودن چنین مدل‌هایی و آگاهی از تأثیر شرایط اقلیمی آینده به مدیران کمک می‌کند تا سناریوهای مناسبی را برای مدیریت عرصه به روشی جامع تدوین کنند. با این وجود، عدم قطعیت‌ها نیز باید در هرگونه اقدامات در نظر گرفته شود.

از سایر پژوهش‌ها، Heydari et al. (2020) تأثیر تغییر اقلیم بر رسوب و فرسایش حوزه آبخیز دهبار در خراسان رضوی برای ۳۰ سال آینده را با کمک مدل آماری LARS-WG و ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) و مدل پیش‌بینی فرسایش آبی WEPP مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان‌دهنده کاهش مقدار رواناب در هر سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5، و RCP 8.5 و افزایش رسوب در سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 و کاهش رسوب فقط در سناریوی RCP 8.5 بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر اقلیم بر فرسایش حوزه آبخیز در آینده تأثیرگذار است. در پژوهشی، Fallah Kalaki et al. (2021) وضعیت رواناب حوزه آبخیز طشک-بختگان را در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل

³ General circulation model

¹ Soil erosion

² Regional climate models

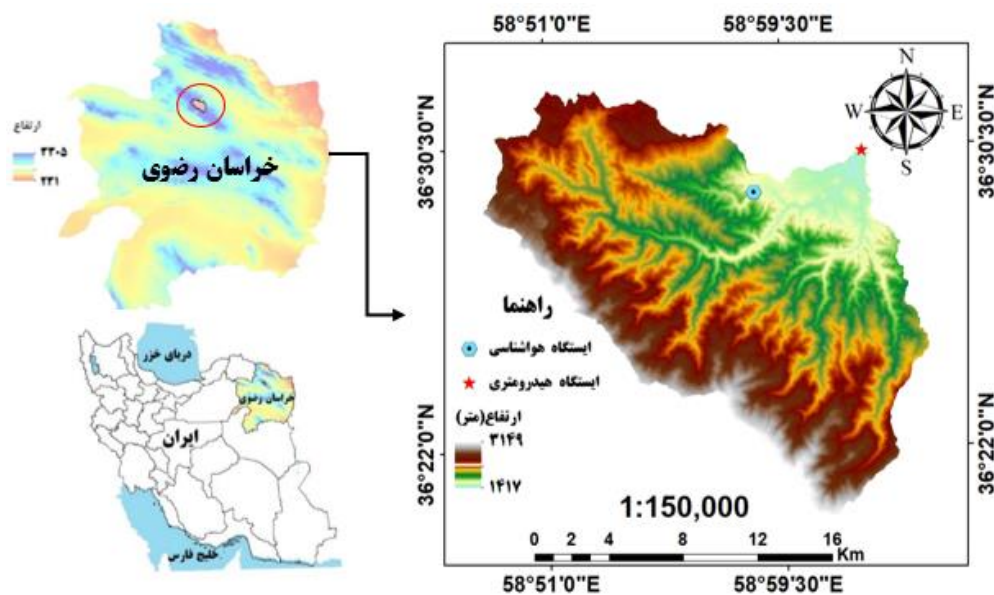
با توجه به پیشینه پژوهش و تغییرات اقلیمی که در میزان رسوب تولیدی کمتر بررسی شده است. بر همین اساس، هدف از پژوهش حاضر بررسی تغییر اقلیم بر میزان رسوب و رواناب تولیدی با استفاده از نتایج پیش‌نگری یکی از مدل‌های اقلیمی گزارش ششم (CMIP6) است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه فریزی، در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه بینالود و در ۵۰ کیلومتری شمال غربی مشهد واقع است. طول جغرافیایی آن ۵۸ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۵۹ درجه و پنج دقیقه و عرض جغرافیایی آن ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقه است (شکل ۱). زهکش اصلی حوزه آبخیز مورد نظر، رودخانه فریزی است که از بخش‌های جنوبی حوزه آبخیز یعنی ارتفاعات بینالود سرچشمه گرفته و در جهت شمال جریان دارد. رودخانه فریزی از دو سرشاخه به نام‌های پایه و فریزی تشکیل شده که پس از پیوستن به یکدیگر جریان اصلی فریزی را به وجود می‌آورند. محیط حوزه آبخیز ۷۵ کیلومتر و مساحت آن ۲۷۳ کیلومترمربع است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز به ترتیب ۱۴۲۵ و ۳۰۹۲ متر و متوسط ارتفاع آن ۲۱۶۳ متر است. متوسط بارندگی حوزه آبخیز ۳۱۱/۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۱/۷ درجه سانتی‌گراد است. شیب حوزه آبخیز ۱۱/۴۳ درصد و شیب آبراهه اصلی ۳/۴۸ درصد است.

SWAT بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های GFDL-ESM2M و IPSL-CMA5 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و مدل‌های GFDL-ESM4 و IPSL-CMA6-LR تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره آینده طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تغییر اقلیم را بررسی نمودند. شبیه‌سازی آن‌ها تحت سناریوهای SSP کاهش رواناب و در سناریوهای RCP افزایش رواناب را نشان داد. در پژوهش دیگری، Hajighasemi et al. (2021) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوزه آبخیز مزلقان پرداختند. ایشان با استفاده از مدل تغییر اقلیم canESM2 و با در نظر گرفتن سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و RCP4.5 برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تغییر اقلیم منطقه مورد مطالعه را ارزیابی نمودند. نتایج آن‌ها بیان‌گر افزایش رواناب بود. هم‌چنین، Chen et al. (2022) در مطالعه موردی از حوزه آبخیز واقع در رودخانه هویه چین با استفاده از مدل SWAT و داده‌های CMIP6 به پیش‌بینی جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که متوسط رواناب سالانه (Qm) و حداکثر رواناب سالانه (Qp) به ترتیب ۸/۱ و ۶/۲ درصد در دهه ۲۰۴۰ و ۷/۱۴ و ۶/۱۸ در دهه ۲۰۸۰ افزایش می‌یابد. در نهایت، Kazemi-Roshtkhari et al. (2022) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز کشف‌رود در خراسان رضوی استفاده کردند. آن‌ها از مدل اقلیمی HADGEM و سناریوی RCP8.5 برای بررسی اثرات تغییر اقلیم استفاده کردند. بر اساس داده‌های خروجی مدل تغییرات دبی رودخانه در آینده نشان‌دهنده کاهش ۲۵ درصدی دبی بود.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز فریزی در استان خراسان رضوی و ایران
Figure 1- Location of the Ferizi Watershed in Khorasan Razavi Province and Iran

۲-۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر در دو گام اصلی انجام شده است. در گام اول به بررسی اقلیم منطقه پرداخته شد ابتدا داده‌های هواشناسی منطقه شامل دمای حداقل و حداکثر و بارندگی روزانه از سازمان هواشناسی اخذ شد. برای بررسی اثر تغییر اقلیم منطقه با استفاده از مدل‌های گردش کلی مشارکت یافته در فاز ششم مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6)، دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با استفاده از سناریوی SSP2-4.5 (سناریوی متوسط) و سناریوی SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه) پیش‌نگری شد. گام دوم شبیه‌سازی مدل SWAT با استفاده از داده‌های موجود است که شامل، نقشه مدل رقومی ارتفاع، خاک، کاربری اراضی و داده‌های هواشناسی است. پس از شبیه‌سازی رواناب و رسوب منطقه با استفاده از مدل SWAT به واسطی مدل شبیه‌سازی شده پرداخته شد. در این مرحله با استفاده از رواناب و رسوب منطقه و با الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP واسطی انجام شده و مدل SWAT در حوزه آبخیز فریزی واسطی شد. سپس داده‌های بارش و دمای پیش‌نگری شده تا سال ۲۱۰۰ به مدل داده شد تا تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب بررسی شود.

۲-۲-۱- شبیه‌سازی حوزه آبخیز با مدل SWAT

SWAT مدلی نیمه فیزیکی، نیمه توزیعی و پیوسته-زمانی است. این مدل شبیه‌ساز فرآیند محور است که برای پیش‌بینی تأثیر مدیریت اراضی بر هیدرولوژی حوزه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی طراحی شده است. جهت اجرای مدل SWAT به دو دسته داده نیاز است؛ اول داده‌های تعریف حوزه آبخیز و دوم داده‌های هواشناسی. جهت حصول به اطلاعات تعریف حوزه آبخیز از مدل رقومی ارتفاع برای تولید

شبکه آبراهه‌ها، مرز حوزه آبخیز و نقشه شیب استفاده می‌شود (شکل ۱). در گام بعدی حوزه آبخیز به تعدادی زیرحوزه آبخیز تقسیم شد. از دیگر داده‌های مورد نیاز نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک‌شناسی منطقه شامل برخی خصوصیات هم‌چون گروه‌های هیدرولوژیکی، عمق، درصد سیلت، شن، رس و وزن مخصوص خاک است. ظرفیت آب قابل دسترس برای گیاه، هدایت هیدرولیکی و کرن آلی نیز مورد نیاز است. در نهایت، مدل با اطلاعات دریافتی می‌تواند واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) یکسان را ایجاد کند. HRU به‌عنوان واحد محاسباتی اصلی در مدل SWAT استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر با توجه به خصوصیات منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز فریزی به ۱۱ زیرحوزه آبخیز و ۳۹ واحد HRU تقسیم شد.

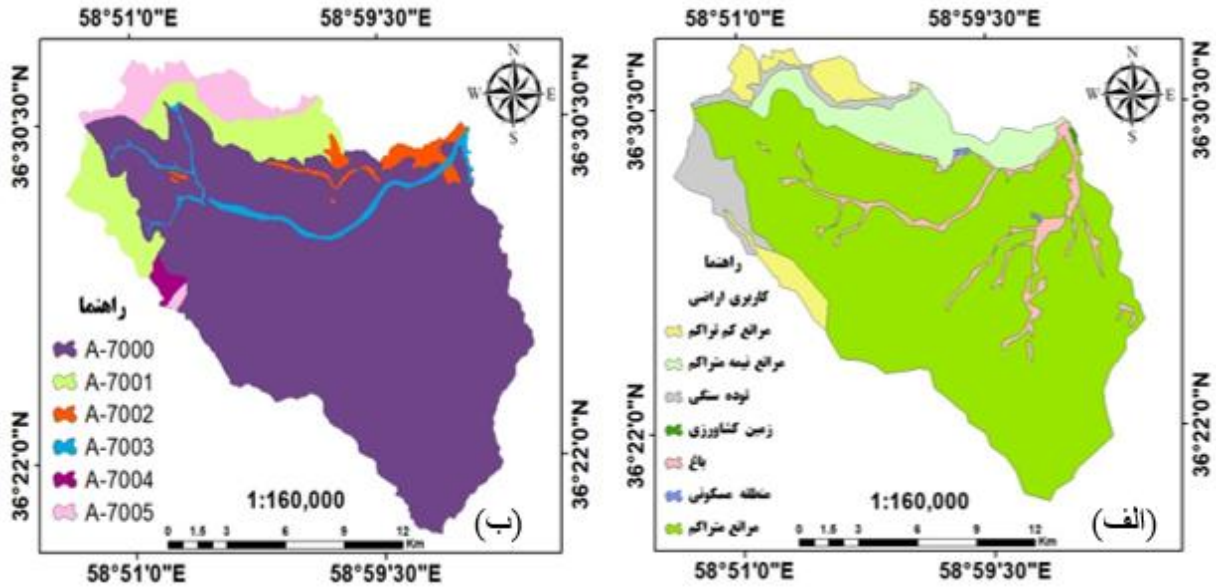
داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه، حداکثر سرعت باد روزانه، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی و ساعات آفتابی روزانه می‌باشد که در این پژوهش از داده‌های سه ایستگاه باران‌سنجی و تبخیرسنجی (فریزی، ارداک بند ساروج و زشک خراسان)، یک ایستگاه سینوپتیک (گلمکان) و یک ایستگاه هیدرومتری (موشنگ) استفاده شده است. مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات مذکور از شرکت آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی خراسان رضوی اخذ شد. دوره آماری مورد بررسی از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۹ تعیین شد و نواقص آماری از طریق ساخت فایل WGN و معرفی به مدل بازسازی شد. هم‌چنین، مدل رقومی ارتفاع از وبگاه سازمان زمین‌شناسی آمریکا و نقشه کاربری اراضی و خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی (شکل ۲-الف و ب) و نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور اخذ شد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

Table 1- Characteristics of the hydrometeorological stations used in the research

ایستگاه	نوع ایستگاه	ارتفاع (متر)	سال‌های آماری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
فریزی	باران‌سنجی	1631	1990-2019	58° 58' 31.1"	36° 29' 11.5"
ارداک بند ساروج	تبخیر سنجی	1320	1990-2019	59° 23' 33.1"	36° 43' 45.9"
زشک خراسان	تبخیر سنجی	1832	1990-2019	59° 11' 43.1"	36° 20' 19"
گلمکان	سینوپتیک	1176	1990-2019	59° 09' 23.3"	36° 29' 02"
موشنگ	هیدرومتری	1423	1990-2019	59° 02' 17.5"	36° 30' 09"

¹ Hydrological response unit



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی (الف) و نقشه خاک (ب) حوزه آبخیز فریزی
Figure 2- Land use map (a) and soil map (b) of Ferizi Watershed

۳-۲-۲- واسنجی، اعتبارسنجی و ارزیابی مدل SWAT هنگامی که از مدل‌ها برای اهداف پژوهشی استفاده می‌شود، ارزیابی مدل جهت تأیید صحت و توانایی و قابلیت مدل لازم و ضروری است (Moriasi et al., 2004). در این پژوهش ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT و نشان دادن تطابق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهده‌ای از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین^۳ و شاخص نش-ساتکلیف^۴ استفاده شد. ضریب تبیین، نشان‌دهنده همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده است مقدار بهینه آن یک است. مقدار ضریب نش-ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا یک است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد شبیه‌سازی مدل از کارایی بالاتری برخوردار است. داده‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی SWAT یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۹) بود، یک دوره سه‌ساله (۱۹۹۲-۱۹۹۰) برای گرم کردن مدل، دوره هفده‌ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۳) به عنوان دوره واسنجی و دوره ۱۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۹) برای اعتبارسنجی انتخاب شد.

۴-۲-۲- پیش‌نگری دما و بارش تا سال ۲۱۰۰ در پژوهش حاضر از خروجی‌های مدل‌ها و سناریوهای فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) استفاده شد. داده‌های موردنیاز از سایت ISIMIP با استفاده از پروتکل ISIMIP2b استخراج شد. بارش به صورت روزانه و دما به صورت حداقل و حداکثر روزانه با مدل MPI-ESM1-2HR تحت

۲-۲-۲- تحلیل حساسیت مدل SWAT با مدل SWATCUP تحلیل حساسیت^۱ عبارت است از میزان تغییر خروجی مدل به ازای تغییر در میزان ورودی‌های آن که برای تعیین متغیرهایی که مدل بیش‌ترین حساسیت را به آن‌ها دارد انجام می‌شود. این عمل روش مناسبی برای تعیین رفتار مدل در مقابل ورودی‌های آن است و از آن می‌توان برای ارزیابی این‌که آیا واکنش بین عوامل به‌طور صحیح شبیه‌سازی شده و وقتی مدل تحت شرایط خاص اجرا می‌شود نتیجه قابل‌قبولی می‌دهد یا نه استفاده نمود (Abbaspour, 2009). دو روش برای تحلیل حساسیت وجود دارد که عبارت‌اند از روش one-at-a-time که در آن رابطه خطی بین متغیر و خروجی متناظر در نظر گرفته می‌شود و فقط تغییرات یک متغیر در خروجی مدل بررسی می‌شود (Remigio and Confesor, 2007) و روش دوم، روش تحلیل حساسیت کلی^۲ است که هم‌زمان تمام متغیرها تغییر می‌کنند و متغیرهای حساس رده‌بندی می‌شوند (Abbaspour et al., 2007). نرم‌افزار SWAT-CUP نرم‌افزاری مناسب برای ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل SWAT است. پس از اجرای مدل SWAT در مرحله اول، تحلیل حساسیت متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و با الگوریتم SUFI-2 انجام شد. برای تحلیل حساسیت متغیرهای مدل، ۳۰ متغیر برای دبی جریان و ۱۲ متغیر برای رسوب به نرم‌افزار SWAT-CUP معرفی شد سپس تحلیل حساسیت انجام شد و متغیرهای حساس در شبیه‌سازی مشخص شد.

³ Coefficient of determination (R^2)

⁴ Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE)

¹ Sensitivity analysis

² Global sensitivity analysis

Value از تعداد ۳۰ متغیر مؤثر بر دبی ۱۲ متغیر و از ۱۲ متغیر مؤثر بر رسوب سه متغیر حساسیت بیش‌تری را از خود نشان دادند. در ادامه، با استفاده از متغیرهای حساس رواناب و رسوب مدل واسنجی و اعتبارسنجی شد. متغیرهای هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک (SOL_K)، زمان انتقال جریان کناری (LAT_TTIME) و شماره منحنی به روش SCS (CN2) بالاترین حساسیت را برای رواناب و متغیر روش مسیریابی رسوب (CH_EQN) بیش‌ترین حساسیت را برای رسوب از خود نشان دادند. متغیرهای منتخب در پژوهش حاضر، در پژوهش‌های (Lin et al. (2020)، Kiyani Majd et al. (2023) نیز به‌عنوان متغیرهای حساس انتخاب شده‌اند.

۳-۲- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

در واسنجی مدل با ورود داده‌های مشاهداتی به همراه فایل خروجی شبیه‌سازی‌شده رواناب و رسوب توسط مدل SWAT، اقدام به مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده می‌شود. در این مرحله متغیرهای مؤثر بر رواناب و رسوب تغییر داده می‌شوند تا داده‌های شبیه‌سازی‌شده به داده‌های مشاهداتی نزدیک شوند. هنگامی که مقدار تابع هدف انتخاب شده به مقدار بهینه برسد اجرای مدل موفقیت‌آمیز بوده است. در این پژوهش از تابع هدف ناش-ساتکلیف استفاده شد. جدول‌های ۲ و ۳ مقادیر بهینه و محدوده مناسب متغیرهای رواناب و رسوب را که طی مراحل متعدد آزمون و خطا به‌دست آمده است را نشان می‌دهد.

سناریوهای SSP به‌صورت تصحیح‌شده با تفکیک افقی ۵/۵×۰/۵ درجه پیش‌نگری شده است. در پژوهشی، Zarrin et al. (2022) به ارزیابی تعدادی از مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که از بین مدل‌های GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، IPSLCM6A، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL برای منطقه شرق ایران دارای بهترین کارایی است. بنابراین، در پژوهش حاضر از این مدل برای پیش‌نگری داده‌های مورد نیاز استفاده شد. داده‌ها از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۴ به‌صورت تاریخی و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ به‌عنوان داده‌های آینده استفاده شد. داده‌های آینده تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که به‌ترتیب سناریوهای متوسط و خیلی بدبینانه هستند، استخراج شد.

۳-۲-۵- پیش‌بینی میزان رواناب و رسوب تحت سناریوهای تغییر اقلیم

داده‌های آینده دما و بارش تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۸۰ ساله ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ به مدل SWAT واسنجی شده وارد و نتایج تغییر در میزان رسوب و رواناب مورد بررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT

پس از انجام مرحله تحلیل حساسیت متغیرهای مؤثر بر دبی و رسوب، متغیرهای حساس انتخاب شدند. با توجه به مقدار P-

جدول ۲- متغیرهای منتخب دبی و مقدار آن‌ها

Table 2- Selected flow parameters and their values

مقدار حداکثر	مقدار حداقل	مقدار بهینه	علامت اختصاری متغیر	معادل فارسی متغیر
8.740814	4.169376	7.929384	r_SOL_K(1).sol	هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک
17.059084	0	3.795645	v_LAT_TTIME.hru	زمان انتقال جریان کناری (روز)
0.00309	-0.031964	-0.0055761	r_CN2.mgt	شماره منحنی به روش SCS
1.617765	0	0.197905	v_SMFMX.bsn	ضریب ذوب برف در اول تیر
0.717278	0.61404	0.71702	v_TIMP.bsn	عامل تأخیر دمای برف
403.453888	39.085812	180.2784	v_PLAPS.sub	مقدار تغییر بارندگی با ارتفاع
137.445572	0	119.2340	v_REVAPMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق برای نفوذ به آبخوان عمیق
3.677312	-0.631468	0.025621	v_SFTMP.bsn	متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (درجه سانتی‌گراد)
0.500987	0.349745	0.462042	v_EPCO.hru	ضریب جذب آب توسط گیاه
0.111496	0.32288	0.098229	r_SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک
2.46482	2.156468	2.192699	v_SOL_BD(1).sol	وزن مخصوص ظاهری خاک
0.806201	0.647921	0.792351	v_ESCO.hru	ضریب تبخیر خاک

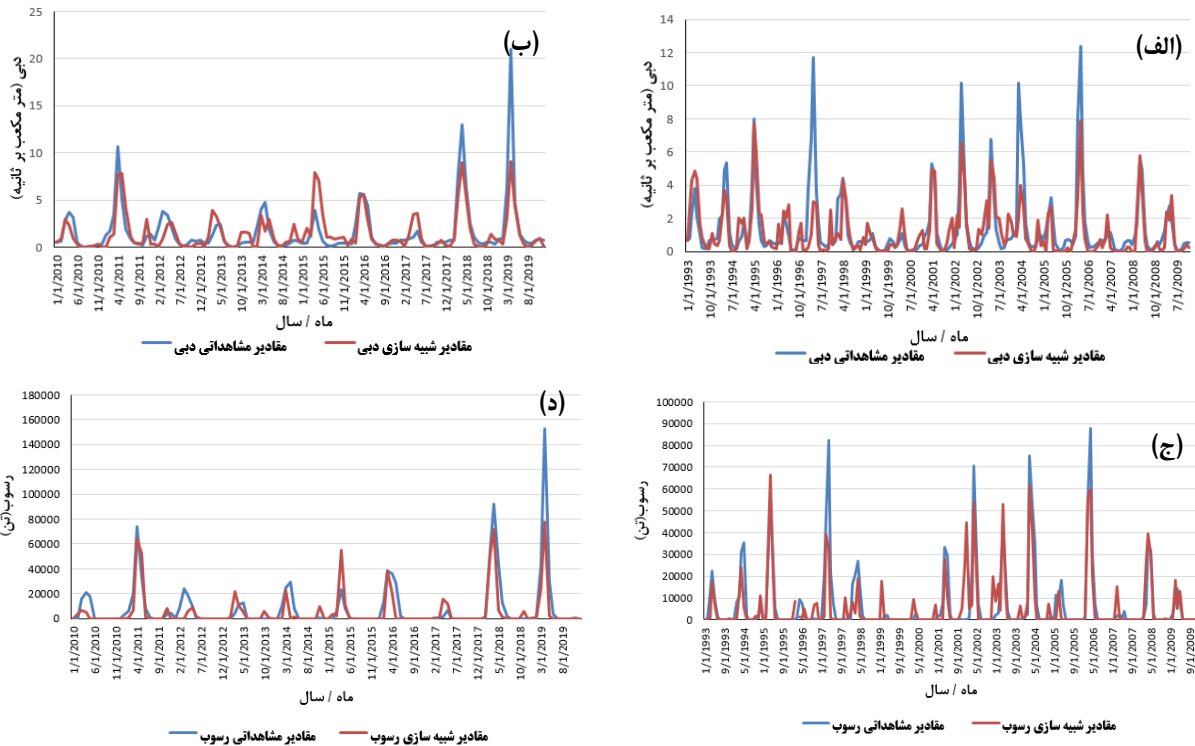
جدول ۳- متغیرهای منتخب رسوب و مقدار آن‌ها

Table 3- Selected sediment parameters and their values

مقدار حداکثر	مقدار حداقل	مقدار بهینه	علامت اختصاری متغیر	معادل فارسی متغیر
3.77749	3.317456	3.650980	v_CH_EQN.rte	روش مسیریابی رسوب
0.552245	0.455965	0.487256	v_CH-COV1.rte	عامل فرسایش آبراهه
0.948069	0.841561	0.929430	r_SPEXP.bsn	توان رابطه انتقال رسوب

Dash et al. و Jimeno Saez et al. (2022), Nikouei (2022) (2023) نشان‌دهنده صحت خوب مدل SWAT بوده است. در شکل ۳ مقادیر دبی و رسوب ماهانه شبیه‌سازی و مشاهداتی برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با مقایسه دو مقدار مشاهده شده و شبیه‌سازی مشخص می‌شود که مدل به خوبی توانسته است رواناب خروجی حوزه آبخیز فریزی را شبیه‌سازی کند اما در مقادیر دبی مدل برآورد خوبی برای رواناب خروجی حوزه آبخیز نداشتند است و به‌طور میانگین رواناب ۶/۴۷ درصد کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است که دلیل آن می‌تواند عدم پیش‌بینی زمان دقیق ذوب برف توسط مدل SWAT باشد. Zhang et al. (2019) و Naseri (2017) نیز چنین اشکالی را در پژوهش‌های خود گزارش کرده‌اند.

نتیجه فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP در جدول ۴ ارائه شده است. به دلیل وجود عدم قطعیت‌های مختلف که بر نتایج خروجی اثر می‌گذارد، هیچ‌گاه ضرایب به مقدار بهینه قطعی نمی‌رسند. شاخص ارزیابی ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی رواناب به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۲ و برای رسوب در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۰ به دست آمده است. شاخص R^2 در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای رواناب به ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۶۳ و برای رسوب به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۱ به دست آمد. میزان P-factor و R-factor برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی رواناب و رسوب قابل قبول بوده‌اند. با توجه به ضریب تبیین و ناش-ساتکلیف صحت شبیه‌سازی مدل SWAT خوب بوده و کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب رضایت‌بخش است. نتایج مطالعه



شکل ۳- مقایسه مقدار دبی ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی ۲۰۰۹-۱۹۹۳ (الف) و دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۹-۲۰۱۰ (ب) مقایسه مقدار رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی ۲۰۰۹-۱۹۹۳ (ج) و دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۹-۲۰۱۰ (د)
 Figure 3- Comparison between the observed and simulated monthly discharge value during the calibration period of 1993-2009 (a) and validation period of 2010-2019 (b) Comparison between the monthly observed and simulated sedimentation value during the calibration period of 1993-2009 (c) and validation period 2010-2019 (d)

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 4- Model evaluation criteria for calibration and validation period

متغیر	دوره	دوره آماری	NS	R^2	PBIAS	RSR	R_factor	P_factor
دبی	واسنجی	1990-2009	0.69	0.70	10.6	0.55	0.58	0.58
	اعتبارسنجی	2009-2019	0.62	0.63	8.5	0.62	0.66	0.66
رسوب	واسنجی	1990-2009	0.66	0.67	8.6	0.58	0.59	0.59
	اعتبارسنجی	2009-2019	0.60	0.61	7.2	0.56	0.67	0.67

۳-۳- نتایج پیش‌نگری دما و بارش

میزان بارش پیش‌نگری شده با سناریوی SSP2-4.5 از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۷ افزایش و از سال ۲۰۴۷ تا ۲۰۷۵ کاهش یافته است و از سال ۲۰۷۵ با روند یکنواخت تا سال ۲۱۰۰ ادامه پیدا خواهد کرد. همچنین، بارش پیش‌نگری شده با سناریوی SSP5-8.5 طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ روند نزولی و در سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ روند صعودی را نشان داده است. میانگین بارش در حوزه آبخیز فریزی در دوره گذشته (۲۰۱۹-۱۹۹۱) ۳۱۱/۱ میلی‌متر در سال بوده است. در صورتی که بارش پیش‌نگری شده برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) در سناریوی SSP2-4.5، ۲۶۶/۱ و در سناریوی SSP5-8.5، ۲۸۱/۴ میلی‌متر در سال پیش‌نگری شده است. میزان بارش در سناریوی SSP2-4.5 و سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته به ترتیب ۱۴/۴ و ۹/۵ درصد کاهش یافته است. میانگین دمای حوزه آبخیز فریزی در دوره گذشته (۲۰۱۹-۱۹۹۱) ۱۱/۷ درجه سانتی‌گراد در سال بوده است در صورتی که دمای پیش‌نگری شده برای دوره آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) در سناریوی SSP2-4.5، ۱۸/۴ و در سناریوی SSP5-8.5، ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین، دما در سناریوی SSP2-4.5 و سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته به ترتیب ۵۷/۲۶ و ۶۵ درصد افزایش خواهد یافت.

۳-۴- نتایج برآورد میزان رواناب و رسوب تحت سناریوی تغییر بارش و دما طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱

پس از واسنجی مدل SWAT در منطقه فریزی به منظور شبیه‌سازی رواناب و رسوب طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با داده‌های بارش و دمای حاصل از سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، شبیه‌سازی انجام گرفت تا میزان تغییر رواناب و رسوب آینده با توجه به تغییر دما و بارش طی دوره آتی به دست آید.

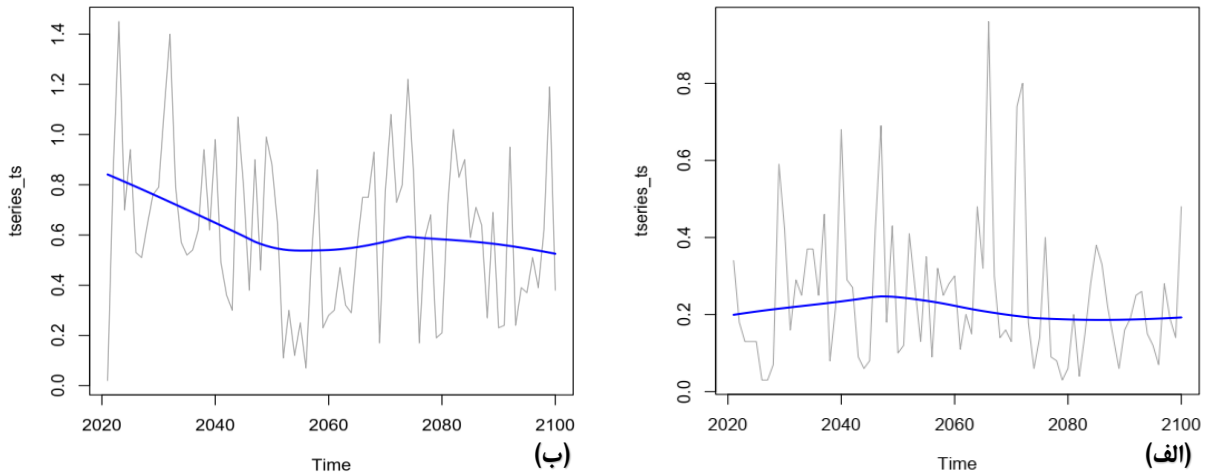
بعد از شبیه‌سازی رواناب با سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۸۰ ساله (۲۰۲۱-۲۱۰۰)، آزمون تحلیل روند من‌کندال^۱ تصحیح شده برای رواناب و رسوب شبیه‌سازی شده انجام گرفت و نشان‌دهنده این بود که عامل رواناب و رسوب هیچ‌گونه روند خاصی ندارند و طی دوره ۸۰ ساله انتخاب شده کاهش و افزایش داشته‌اند. علی‌رغم عدم وجود روند خاص در دوره ۸۰ ساله، میزان رواناب در سناریوی SSP2-4.5، از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۷ افزایش یافته است و از سال ۲۰۴۷ تا ۲۰۵۷ روند نزولی داشته است. در سناریوی SSP5-8.5، رواناب از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ روند کاهشی داشته و از سال ۲۰۵۲ تا ۲۰۷۵ افزایش یافته است سپس از سال ۲۰۷۵ تا ۲۱۰۰ با روند نزولی همراه بوده است. میانگین رواناب طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با سناریوی SSP2-4.5،

۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و با سناریوی SSP5-8.5، ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است در صورتی که میزان رواناب دوره گذشته ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. با انجام آزمون T برای رواناب دوره پایه و رواناب پیش‌بینی شده با سناریوی SSP2-4.5، اختلاف معناداری بین دو گروه داده پیدا نشد (sig=۰/۰۵۳). همچنین، نتایج آزمون T (sig=۰/۰۹۵) برای رواناب پیش‌بینی شده با سناریوی SSP5-8.5 نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار بین رواناب گذشته و رواناب پیش‌بینی شده با این سناریو می‌باشد. به‌طور کلی میزان رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره گذشته کاهش یافته است که دلیل آن کاهش میزان بارش و افزایش میانگین دمای حوزه آبخیز فریزی در دوره آینده می‌باشد. کاهش میزان رواناب با شرایط اقلیم آینده با نتایج Sanikhani et al. (2013)، Ahmadi et al. (2015) و Malmir et al. (2016) هم‌سو بوده است. نتایج حاصل از تحلیل رواناب پژوهش حاضر که نشان‌دهنده بیش‌تر بودن میزان رواناب در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) نسبت به سناریوی متوسط (SSP2-4.5) است در راستای پژوهش Ahmadi et al. (2020) و Khazaei Feyizabad et al. (2020) است. همچنین، در پژوهش Abbaszadeh et al. (2023) پیش‌بینی شد که تغییرات آینده آب و هوا و LULC منجر به افزایش میزان جریان در سناریوی SSP5-8.5 تا دهه ۲۰۵۰ شده است که دلیل آن بالا بودن میزان بارندگی در این دوره بوده است. همچنین، مجموع رسوب دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با سناریوی SSP2-4.5، ۳/۵۷ میلیون تن و با سناریوی SSP5-8.5، ۴/۹۴ میلیون تن پیش‌بینی شده است. میزان رسوب دوره گذشته ۳/۳۳ میلیون تن برآورد شده است. با انجام آزمون T برای رسوب دوره پایه و رسوب پیش‌بینی شده با سناریوی SSP2-4.5، اختلاف معناداری بین دو گروه داده پیدا نشد (sig=۰/۰۸۶). همچنین، نتایج آزمون T (sig=۰/۳۴۳) برای رسوب پیش‌بینی شده با سناریوی SSP5-8.5 نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار بین رسوب گذشته و رسوب پیش‌بینی شده با این سناریو می‌باشد. شکل ۷ روند رواناب و شکل ۸ روند رسوب شبیه‌سازی شده را برای دور ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با داده‌های شبیه‌سازی شده دما و بارش با سناریوهای پیش‌بینی نشان می‌دهد. رسوب پیش‌بینی شده در سناریوی SSP2-4.5 طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ روند صعودی داشته و از ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ کاهش یافته است در صورتی که رسوب شبیه‌سازی شده در سناریوی SSP5-8.5 از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۶۰ کاهش و از سال ۲۰۶۰ تا ۲۱۰۰ افزایش یافته است. به‌طور کلی میزان رسوب تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره گذشته افزایش یافته است. نتایج

^۱ Maan-Kendall

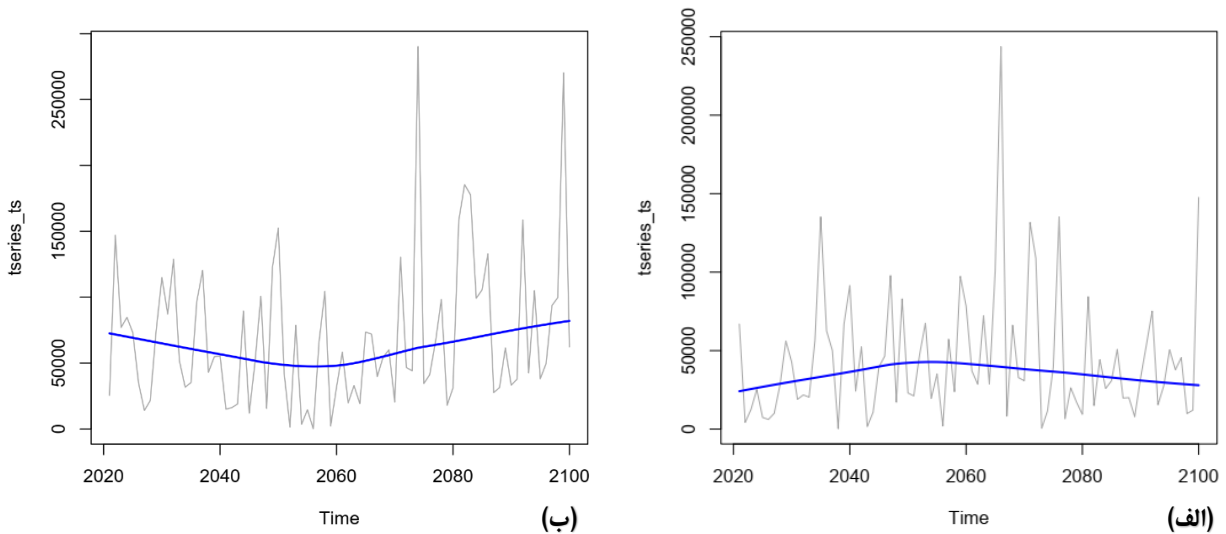
آبخیز باشد. افزایش شدت بارش با وجود کاهش بارش سالانه در پژوهش Heydari and Khazaee (2018) گزارش شده است.

Heydari (2011) و Azari (2015) در همین راستا بودند. افزایش رسوب می‌تواند به دلیل افزایش بارش‌های حدی در حوزه



شکل ۷- روند رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با داده‌های شبیه‌سازی شده دما و بارش با سناریوی SSP2.4.5 (الف) و سناریوی SSP5.8.5 (ب)

Figure 7- Runoff trend simulated by SWAT model for the period 2021-2100 with simulated temperature and precipitation data with SSP2.4.5 scenario (a) and SSP5.8.5 scenario (b)



شکل ۸- روند رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ با داده‌های شبیه‌سازی شده دما و بارش با سناریوی SSP2.4.5 (الف) و سناریوی SSP5.8.5 (ب)

Figure 8- Precipitation trend simulated by SWAT model for the period 2021-2100 with simulated temperature and precipitation data with SSP2.4.5 scenario (a) and SSP5.8.5 scenario (b)

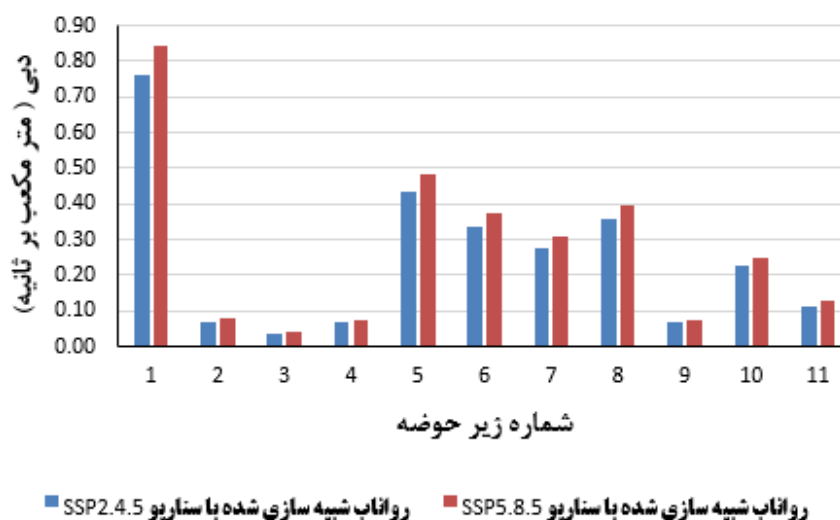
چنین، کم‌ترین میزان رواناب شبیه‌سازی شده در هر دو سناریو در زیرحوزه آبخیز ۳ مشاهده می‌شود. میزان رسوب شبیه‌سازی شده با سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در شکل ۱۰ مقایسه شده‌اند، زیرحوزه آبخیز ۱ که همان خروجی حوزه است. بیش‌ترین میزان رسوب شبیه‌سازی شده را به خود اختصاص داده است. افزایش میزان رسوب با وجود کاهش رواناب و بارش در خروجی

۳-۵- تحلیل نتایج شبیه‌سازی رواناب و رسوب در زیرحوزه‌های آبخیز

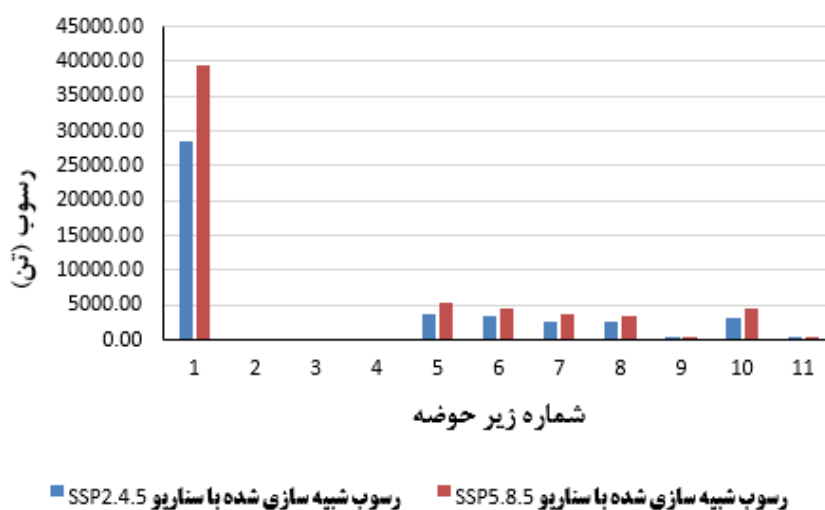
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود میزان رواناب شبیه‌سازی شده در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در زیرحوزه آبخیز ۱ بیش‌تر از سایر زیرحوزه‌های آبخیز بوده است که دلیل آن عدم وجود کاربری مرتع در این زیرحوزه آبخیز است. هم

اراضی، خاک و توپوگرافی باعث ایجاد اختلاف در میزان فرسایش و رسوب در زیرحوزه‌های آبخیز فریزی شده است.

حوزه آبخیز فریزی می‌تواند نشان‌دهنده بارش‌های کوتاه‌مدت با شدت زیاد باشد. زیرحوزه آبخیز ۲ کم‌ترین مقدار رسوب شبیه‌سازی شده را در هر دو سناریو نشان می‌دهد. تفاوت کاربری



شکل ۹- مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده با سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در زیرحوزه‌های آبخیز
Figure 9- Comparison of simulated runoff with SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios in sub-watersheds



شکل ۱۰- مقایسه رسوب شبیه‌سازی شده با سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در زیرحوزه‌های آبخیز
Figure 10- Comparison of simulated sediment with SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios in sub-watersheds

ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۱ به‌دست آمد که نشان‌گر انطباق مناسب داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی است. بنابراین، به‌طورکلی مدل SWAT در حوزه آبخیز مورد مطالعه شبیه‌سازی خوبی را انجام داده است. پس از این‌که مراحل واسنجی و اعتبارسنجی انجام گرفت و از صحت مدل SWAT برای شبیه‌سازی اطمینان حاصل شد، از دو سناریوی مختلف اقلیمی گزارش ششم شامل SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب دوره آینده طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا مدل SWAT با استفاده از شاخص ارزیابی ناش-ساتکلیف مورد بررسی قرار گرفت و مقدار این ضریب برای رواناب ماهانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۲ و برای رسوب ماهانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۰ به‌دست آمد. با بررسی ضریب تبیین (R^2) مقدار این ضریب برای رواناب ماهانه در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۶۳ و برای رسوب ماهانه به

شبیه‌سازی انجام شده و میزان رسوب و رواناب ماهانه طی دوره ۸۰ ساله برآورد شد.

نتایج رواناب و رسوب حاصل از شبیه‌سازی مدل SWAT تحت شرایط اقلیم آینده با دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داد که میانگین رواناب در این دو سناریو به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۸ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است که نشان‌دهنده کاهش ۴۸/۹ درصدی رواناب در سناریوی SSP2-4.5 و کاهش ۴۲/۸ درصدی رواناب در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته است. همچنین، مجموع رسوب برای سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۳/۵۷ و ۴/۹۴ میلیون تن پیش‌بینی شده که نشان‌دهنده افزایش ۷/۲ درصدی رسوب در سناریوی SSP2-4.5 و افزایش ۴۸/۳ درصدی رسوب در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره گذشته است. میانگین رواناب و مجموع رسوب در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) بیش‌تر از سناریوی متوسط (SSP2-4.5) بوده است. مجموع میانگین بارش در سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲۶۶/۱ و ۲۸۱/۴ میلی‌متر در سال و میانگین دما در سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۱۸/۴ و ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد پیش‌نگری شده است. بنابراین، دلیل افزایش رواناب و رسوب در سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی متوسط بیش‌تر بودن میزان بارش در سناریوی بدبینانه است. با توجه به افزایش شرایط سیلابی حوزه آبخیز و افزایش میزان بار رسوبی در افق ۲۱۰۰، جهت مقابله و سازگاری با تغییر اقلیم بهتر است در حوزه آبخیز فریزی راه‌کارهای مناسب انجام شود. پیشنهاد می‌شود علاوه بر بررسی میزان رواناب و رسوب از تبخیر-تعرق، به دلیل این‌که جزء جدا نشدنی چرخه هیدرولوژیکی است استفاده شود تا با اطمینان بیش‌تری بتوان راجع به تأثیر عوامل اقلیمی بر فرسایش صحبت کرد. همچنین، استفاده از دیگر برنامه‌های واسنجی مانند GLUE، Parasol و MCMC و مقایسه نتایج آن‌ها با SUFI-2 برای بررسی توانایی هر کدام در واسنجی مدل SWAT در حوزه آبخیز فریزی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی و سازمان هواشناسی جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز پژوهش حاضر که مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد است، سپاس‌گزار می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

الهه شیخ‌رودی: مفهوم‌سازی، انجام مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **علی گلکاریان:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **آذر زرین:** مشاوره، بازبینی متن مقاله، راهنمایی؛ **علیرضا راشکی:** مشاوره، راهنمایی.

منابع

- احمدی، آزاده، خرمیان، امین، و صفوی، حمیدرضا (۱۳۹۴). بررسی تغییر اقلیم بر فرآیند تبدیل برف به رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۱)، ۷۰-۸۲. doi:10.22631/jicr.2018.1992.2556
- احمدی، مهدی، معتمدوزیری، بهارک، احمدی، حسن، معینی، ابولفضل، و زهتابیان، غلامرضا (۱۳۹۹). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب آبخیز کن در دوره آینده. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۳(۲)، ۸۱-۹۶. doi:10.24200/j30.2017.20053
- آذری، محمود (۱۳۹۴). اثر تغییر اقلیم بر میزان رواناب و رسوب حوزه آبخیز تهر گلستان. کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط زیست؛ افق‌های آینده، نگاه به گذشته. تهران. doi:10.22631/icceconf.2017.15496.1215
- ثانی‌خانی، هادی، دین‌پژوه، یعقوب، پیوروسف، سعید، زمان دادقویدل، سروین، و صولتی، بهاره (۱۳۹۲). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه‌های آبریز (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای در استان آذربایجان شرقی). *آب و خاک*، ۶(۲۷)، ۱۲۲۵-۱۲۳۴. https://sid.ir/paper/141085/fa
- حاجی‌قاسمی، شهاب و ذاکری‌نیری، محمود، و نجفی‌جیلانی، عطاله (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی با مدل SWAT (مورد مطالعه: رودخانه مزلقان). *آبیار و زهکشی ایران*، ۱۵(۱)، ۱۳۷-۱۴۱. doi:20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1
- حیدری، حامد (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر فرسایش‌پذیری حوضه با استفاده از مدل‌های WEPP و SWAT (مطالعه موردی: حوضه دهبار). *رساله دکتری*. دانشگاه فردوسی مشهد. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jame.35.4.27
- حیدری، عبدالمجید (۱۳۹۰). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی و رسوب حوزه آبخیز سد طرق مشهد. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه یزد. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29
- حیدری، مجتبی، و خزایی، محمدرضا (۱۳۹۶). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حداکثر روزانه کرمانشاه. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۷(۲)، ۲۷-۳۹. https://sid.ir/paper/232133/fa
- خزاعی فیض‌آباد، الناز، پودینه، محمدرضا، وحیدیان‌پور، محسن. (۱۳۹۸). بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه کارواندر. *جغرافیا*، ۱۷(۶۳)، ۱۶۱-۱۷۸. https://sid.ir/paper/382343/fa

کیانی‌مجد، مهناز، نهتانی، محمد، دهمرده قلعه‌نو، محمدرضا، و شیخ، زهرا (۱۴۰۲). شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های آبخیز مناطق خشک در مقیاس ماهانه با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لار). *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، ۱۴(۳۷): ۱۴۵-۱۳۵. doi:10.61186/jwmr.14.27.135

مالمیر، مهسا، محمدرضاپور، ام‌البین، شریف آذری، سلمان، و قندهاری، قاسم (۱۳۹۵). بررسی تغییر اقلیم بر رواناب حوضه قره‌سو با استفاده از ریزمقیاس نمایش آماری مدل‌های HADCM3 و شبکه عصبی پویا. *پژوهش‌های تحقیقات آب و خاک*، ۲۳(۳): ۳۱۷-۳۲۶. doi:10.24200/j40.2018.10749.1406

ناصری، فرزانه (۱۳۹۶). بهینه‌سازی مکانیزم حفاظت آب و خاک با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و الگوریتم طرحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.57

نیکویی، حامد (۱۴۰۱). ارزیابی سلامت، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری حوضه آبخیز سد فریمان در شرایط تغییر اقلیم. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشگاه فردوسی مشهد. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29

عرب، داود (۱۳۹۶). پتانسیل اثر تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری فرسایش خاک در حوزه آبخیز اوغان (شرق استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه گنبد کاووس. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29

فلاح کلاکی، محمد، شکری کوچک، وحید، و رضانی اعتدالی، هادی (۱۴۰۰). شبیه‌سازی محیط تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بخنگان). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷(۳): ۳۵۹-۳۵۸. http://dx.doi.org/10.52547/envs.18.4.161

قضاوی، رضا، غفاری، عباس، و خانی، سیامک (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده و برآورد رسوب معلق حوضه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر کرد). *پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*، ۱۸(۹): ۲۸۳-۲۷۱.

کاظمی رشخواری، سیدایمان، اسدی وایقان، امیر، و آذری، محمود (۱۴۰۱). بررسی تغییر اقلیم بر روی دبی با استفاده از مدل SWAT مورد مطالعه: حوضه آبریز کشفورد سومین کنفرانس بین‌المللی و ششمین کنفرانس ملی صیانت از منابع طبیعی و محیطی زیست، دانشگاه محقق اردبیلی. doi:10.29171/azu_acku_risalah_k3585_bay87_1396

References

- Abbaspour, K.C. (2009). User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 pages.
- 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), 413-430. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Abbazadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Rafiei Sardooi, E., & Jamshidi, S. (2023). Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management* 37, 4177-4194. doi:10.1007/s11269-023-03545-6
- Ahmadi, A., Khormian, A., & Safavi, H. (2015). Investigating climate change on the process of snowmelt to runoff, case study: Zayandeh-Rood watershed. *Water Resources Research*, 11(1), 70-82. doi:10.22631/jicr.2018.1992.2556
- Ahmadi, M., Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Moeini, A., & Zehtabian, Gh. (2019). Assessing the impact of climate change on watershed runoff in the future. *Watershed Management Research*, 33(2), 81-66. doi:10.24200/j30.2017.20053
- Arab, D. (2017). The potential effect of climate change on soil erosion vulnerability in the Oghan watershed (East of Golestan province). *M.Sc. Thesis*. Gonbad Kavous University. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29
- Azari, M. (2015). The effect of climate change on runoff and sedimentation in the Tamr-Golestan watershed. International Conference on Architecture, Urban Planning, Civil Engineering, Art and Environment; Future Horizons, Looking Back. Tehran. doi:10.22631/iceconf.2017.15496.1215
- Chen, C., Gan, R., Feng, D., Yang, F., & Zuo, Q. (2022). Quantifying the contribution of SWAT modeling and CMIP6 inputting to streamflow prediction uncertainty under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132675. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132675
- Dash, S.S., Sahoo, Bhabagrahi., Raghuvanshi, N.S. (2023). SWAT model calibration approaches in an integrated paddy dominated catchment command. *Agricultural Water Management*, 278, 108138. doi:10.1016/j.agwat.2023.108138
- Falah Kalaki, M., Shokri Kouchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the climate change environment using CMIP5 and CMIP6 climate models on runoff using the SWAT hydrological model (Case study: Tashk-Bakhtegan watershed). *Water Resources Research*, (3)17, 359-345. http://dx.doi.org/10.52547/envs.18.4.161
- Field, C.B., & Barros, V.R. (2014). climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press, New York, NY.
- Ghazavi, R., Ghaffari, A., & Khani, S. (2018). Investigating the impact of future climate change and estimating suspended sediment in watersheds

- (case study: Shahrekord watershed). *Journal of Watershed Management*, 9(18), 283-271.
- Hajjighasemi, Sh., Zakeri-Nairy, M., & Najafi Jilani, A. (2021). Investigating the impact of climate change on surface runoff using the SWAT model (Case study: Mazalqan River). *Irrigation and Drainage*, 15(1), 121-137. doi:10.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1
- Heydari, A. (2011). Investigating the impact of climate change on discharge and sediment in the watershed of Torah Dam, Mashhad. *M.Sc. Thesis*, Yazd University. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29
- Heydari, H. (2020). The effect of climate change on basin erodibility using WEPP and SWAT models (Case study: Dehbar basin). Ph.D. thesis. Ferdowsi University of Mashhad. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jame.35.4.27>
- Heydari, M., & Khazaei, M. (2018). Assessing the impact of climate change on maximum daily precipitation in Kermanshah. *Soil and Water Resources Conservation*, 7(2), 27-39. <https://sid.ir/paper/232133/fa>
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: The physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller H.L. (Eds), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. doi:10.1017/9781009157896
- Jimeno-Sáez, Patricia., Martínez-España, R., Casalí, J., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J. (2022). A comparison of performance of SWAT and machine learning models for predicting sediment load in a forested Basin, Northern Spain. *Catena*, 212, 105953. doi:10.1016/j.catena.2021.105953
- Kazemi-Roshtkhari, S., Asadi Vaighan, A., & Azari, M. (2022), Investigating climate change on discharge using the SWAT model, case study: Kashfarud watershed. Third International Conference and Sixth National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, University of Mohagheh Ardabili. doi:10.29171/azu_acku_risalah_k358_5_bay87_1396
- Khazaei Feizabad, E., Poudineh, & M., Vahidianpour, M. (2020). Investigating the effect of climate change on the runoff of the Karvander River. *Geography*, 17(63), 161-178. <https://sid.ir/paper/382343/fa>
- Kiyani Majd, M., Nohtani, M., Dehmardeh Qale-No, M., & Sheikh, Z. (2023). Simulation of runoff in dry areas watersheds on a monthly scale using the SWAT model (Case study: Lar watershed). *Journal of Watershed Management*, 14(27): 145-135, doi:10.61186/jwmmr.14.27.135
- Lin, K.H. (2020). Comparative analysis of SWAT CUP and SWATSHARE for calibrating SWAT models. Master dissertation. Lyles School of Civil Engineering, West Lafayette, Indiana, MA.
- Litschert, S., Theobald, D., & Brown, T. (2014). Effects of climate change and wildfire on soil loss in the Southern. *Catena*, 118, 206-219. doi:10.1016/j.catena.2014.01.007
- Malmir, M., Mohammad Rezapour, U., Sharif Azari, S., & Qandhari, Q. (2016). Investigating climate change on runoff in the Gharesu basin using the microscale statistical representation of HADCM3 models and dynamic neural networks. *Soil and Water Research*, 23(3), 317-326. doi:10.24200/j40.2018.10749.1406
- Moriasi, D. (2004). Modeling the effects of rainfall intensity and deep chiseling on infiltration and runoff within DRAINMOD for alluvial soils. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College ProQuest Dissertations Publishing, 3151841. doi:10.31390/gradschool_dissertations.1700
- Mukundan, R., Pradhanang, S., Donald, C., Anandhi, A., Zion, M., & Matose, A. (2013). Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a new York City water supply watershed. USA. 183:110119. doi:10.1016/j.geomorph.2012.06.021
- Mullan, D., Favis-Mortlock, D., & Fealy, R. (2012). Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 18-30. doi:10.1016/j.agrformet.2011.12.004
- Nasari, F. (2017). Optimization of soil and water conservation mechanism using hydrological modeling and design algorithm. *M.Sc. Thesis*, Ferdowsi University of Mashhad. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.57
- Nikouei, H. (2022). Assessment of health, resilience and vulnerability of Fariman Dam watershed under climate change conditions. Master's thesis. Ferdowsi University of Mashhad. doi:10.18869/acadpub.jstnar.21.2.29
- Paroissein, J., Darboux, F., Couturier A., Devillers, B., Mouillot, F., Raclot, D., & Le Bissonnais, L. (2015). A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management*, 150, 57-68. doi:10.1016/j.jenvman.2014.10.034
- Plangoen, P., Babel, M., Clemente, R., Shrestha, S., & Tripathi, N. (2013). Simulating the impact of future land use and climate change on soil erosion and. and Climate Change on Soil Erosion and Deposition in the Mae Nam Nan Sub-Catchment, Thailand. *Sustainability*, 5(8), 3244-3274. doi:10.3390/su5083244

- Remegio, B., & Confesor, Jr. (2007). Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters. *Abstract book of 3th ASABE Annual International Meeting*. doi:10.13031/2013.23224
- Routschek, A., Schmidt, J., Kreienkamp, F. (2014). Impact of climate change on soil erosion- a high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/ Germany. *Catena*, 121, 99–109. doi:10.1016/j.catena.2014.04.019
- Sanikhani, H., Dinpajouh, Y., Pouryousef, S., Zamandaghoidel, S., & Solati, B. (2013). Investigating the effects of climate change on runoff in watersheds (Case study: Ajichay watershed in East Azerbaijan province). *Water and Soil*, 27(6), 1225-1234. <https://sid.ir/paper/141085/fa>
- Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884. doi:10.1002/joc.6307
- Shrestha, N.K., & Wang, J. (2018). Predicting sediment yield and transport dynamics of a cold climate region watershed in changing climate. *Science of the Total Environment*, 625, 1030–1045. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.347
- Terranova, O., Antronico, R., Coscarelli, R., & Iaquina, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (Southern Italy). *Geomorphology*, 112, 228–245. doi:10.1016/j.geomorph.2009.06.009
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 441–464. doi:10.1007/s00024-021-02904-x
- Zhang, X.C., & Nearing, M.A. (2005). Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena*, 61, 185–195. doi:10.1016/j.catena.2005.03.009