

Investigating the effects of climate change using the results of the sixth report of the inter-state delegation on the amount of runoff and sediment yield

Mohammad Reza Sheykh Rabiee¹, Hamid Reza Peyrowan^{2*}, Peyman Daneshkar Arasteh³, Mehry Akbary⁴ and Baharak Motamedvaziri⁵

¹ Graduated PhD in Watershed Science and Engineering, Department of Forest, Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

³ Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Forest, Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 09 May 2024

Accepted: 17 August 2024

Extended abstract

Introduction

Climate change is one of the most important challenges that affects natural ecosystems and different aspects of human life. The effects of global warming on the hydrology and water cycle in nature are very serious, and knowing these effects quantitatively creates more preparation to deal with its consequences. It is necessary to evaluate these changes in order to reduce their effects on the basin and formulate a suitable strategy to minimize their adverse effects. This study uses a combined model of SDSM and SWAT to investigate the effects of climate change on the amount of runoff and sediment in Karganrood watershed in Gilan province in Iran. The water measuring station (Mashin Khaneh) is located inside this basin and has a long statistical history. Also, the least amount of land use changes has taken place in this basin, which can better show the results of revealing climate changes on the amount of runoff and sediment.

materials and methods

In order to investigate the consequences of climate change on runoff and sediment, SWAT hydrological model was used. The SWAT model was calibrated and validated by the SUFI-2 algorithm by improving the simulation results of discharge flow and basin sediment. After the implementation of SWAT model, 109 hydrological response units (HRU) were extracted in five sub-basins. After 500 steps of simulation, finally 22 parameters in runoff production and 6 parameters in sediment production of Karganrood watershed were identified as effective parameters. Then, according to the values obtained from NS, R² and RMSE evaluation criteria, it was found that CanESM5 climate model has better accuracy and efficiency than MPI-ESM1.2-HR and NorESM2-MM climate models. By introducing the time series of daily average precipitation and temperature resulting from the output of the CanESM5 climate model and using the SDSM downscaling model, the runoff and sedimentation of the Karganrood basin on a monthly basis at the Mashin Khaneh hydrometric station in the periods of 2026-2050, 2075-2051 and 2100- 2076 for two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Simulated.

Results and discussion

According to the values obtained from NS, R² and RMSE evaluation criteria, it was found that CanESM5 climate model has better accuracy and efficiency than MPI-ESM1.2-HR and NorESM2-MM climate models. The results of the CanESM5 model indicate that precipitation, maximum and minimum temperature will decrease in all future periods based on SSP2-4.5. Also, the examination of CanESM5 model results in connection with SSP5-8.5 shows that precipitation will decrease in all future periods and the maximum temperature will increase in the period of 2051-2075 and 2076-2100. Also, the results of

* Corresponding author: hrpeyrowan@gmail.com

climate data in all three climate models and in both scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 showed that the period of 2076-2100 will be drier and warmer than other periods. In order to investigate the consequences of climate change on runoff and sediment using the SWAT hydrological model and by introducing the time series of average daily precipitation and temperature from the output of the CanESM5 climate model and using the SDSM downscaling model, the runoff and sediment of the Karganrood basin on a monthly basis at the station Car house hydrometry in the periods 2050-2026, 2051-2075 and 2076-2100 for two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Simulated. The results of the SWAT model showed that the runoff changes for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios will decrease and the sediment changes will increase in all future periods.

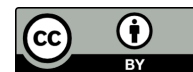
Conclusion

Using the output data of the CanESM5 climate model related to the sixth report and under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios and using the SWAT model, the amount of runoff and sediment in three time periods of the near future (2026-2050), medium (2051- 2075) and period (2076-2100) was carried out. The amount of sediment at the exit point of the Mashin Khaneh water measuring station showed an increasing trend. Also, the results showed that the observed stream flow limit does not match with the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios in the future periods, but the observed sedimentation is compatible with the future periods. The data of the SSP2-4.5 scenario showed that discharge will decrease in all periods and sediment will increase in all future periods. The largest changes in discharge are related to the future period of 2076-2100 and amount to -56.7 percent, and the lowest number of changes in discharge are related to the future period of 2026-2050 and amount to -48.5 percent. The highest sediment changes are related to the future period of 2051-2075 and amount to 54.3% and the lowest amount of sediment changes are related to the future period of 2026-2050 and amount to 5.12%. Also, the results of the SWAT model based on the data of the SSP5-8.5 scenario showed that discharge will decrease in all periods and sediment will increase in all future periods. The largest changes in the flow rate are related to the future period of 2076-2100 and amount to -56% and the lowest number of changes in the flow rate are related to the future period of 2026-2050 and amount to -52.8%. The highest sediment changes are related to the future period of 2076-2100 and amount to 113.27% and the lowest amount of sediment changes are related to the future period of 2026-2050 and amount to 29%. It seems that the decrease in rainfall in the coming periods will cause a decrease in vegetation, especially in late summer and early autumn and with the melting of the remaining snow in the highlands due to the increase in temperature; The amount of produced runoff increases, which will increase the sediment produced in the basin.

Keywords: Karganrood watershed, Precipitation, SDSM, SWAT, Temperature

Cite this article: Sheykh Rabiee, M.R., Peyrowan, H.R., Daneshkar Arasteh, P., Akbary, M., Motamedvaziri, B., 2025. Investigating the effects of climate change using the results of the sixth report of the inter-state delegation on the amount of runoff and sediment yield. *Watershed Engineering and Management* 16(4), 550-570.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



بررسی اثرات تغییرات اقلیم با استفاده از نتایج گزارش ششم هیات بین الدول بر میزان تولید رواناب و رسوب

محمد رضا شیخ ربیعی^۱، حمیدرضا پیروان^{۲*}، پیمان دانشکار آراسته^۳، مهری اکبری^۴ و بهارک معتمدوزیری^۵
^۱ دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران
^۴ دانشیار گروه اقلیم شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
^۵ دانشیار گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه

تغییر اقلیم، یکی از مهمترین چالش‌هایی است که بر اکوسیستم‌های طبیعی و جنبه‌های مختلف زندگی انسان تأثیر دارد. تأثیرات گرمایش جهانی و به تبع آن اثرات تغییر اقلیم بر بخش هیدرولوژی و چرخه آب در طبیعت بسیار جدی است و شناخت این اثرات به صورت کمی، آمادگی بیشتری برای مقابله با تبعات آن ایجاد می‌کند. ارزیابی این تغییرات برای کاهش اثرات آنها بر حوضه و تدوین استراتژی مناسب برای به حداقل رساندن آثار سوء آنها ضروری است. این پژوهش با استفاده از مدل ترکیبی SWAT و SDSM به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب و رسوب حوزه آبخیز کرگانرود در استان گیلان می‌پردازد. ایستگاه آب‌سنجی (ماشین‌خانه) در داخل این حوضه قرار دارد و دارای سابقه طولانی آماری است. همچنین، در این حوضه کمترین میزان تغییرات کاربری اراضی صورت گرفته است که این امر می‌تواند نتایج آشکارسازی تغییرات اقلیم بر روی میزان رواناب و رسوب را بهتر نمایان سازد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شد. مدل SWAT توسط الگوریتم SUFI-2 با بهبود نتایج شبیه‌سازی جریان دبی و رسوب حوضه، مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. پس از اجرای مدل SWAT تعداد ۱۰۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک در پنج زیرحوضه استخراج شد. پس از ۵۰۰ مرحله اجراء شبیه‌سازی در نهایت، ۲۲ شاخص در تولید رواناب و شش پارامتر در تولید رسوب حوزه آبخیز کرگانرود به عنوان پارامترهای مؤثر شناخته شدند. سپس با توجه به مقادیر به دست آمده از معیارهای ارزیابی NS ، R^2 و $RMSE$ ، مشخص شد که مدل اقلیمی CanESM5 از دقت و کارایی بهتری نسبت به مدل‌های اقلیمی MPI-ESM1.2-HR و NorESM2-MM برخوردار است. با معرفی سری زمانی میانگین بارش و دمای روزانه حاصل از خروجی مدل اقلیمی CanESM5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس SDSM، رواناب و رسوب حوضه کرگانرود به صورت ماهانه در ایستگاه

هیدرومتری ماشین‌خانه در دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ برای دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی R^2 ، NS و RMSE، مشخص شد که مدل اقلیمی CanESM5 از دقت و کارایی بهتری نسبت به مدل‌های اقلیمی MPI-ESM1.2-HR و NorESM2-MM برخوردار است. نتایج مدل CanESM5 حاکی از این است که بارندگی، دمای حداکثر و حداقل در تمامی دوره‌های آبی براساس SSP2-4.5 کاهش می‌یابد. همچنین، بررسی نتایج مدل CanESM5 در ارتباط با SSP5-8.5 نشان می‌دهد، بارندگی در تمامی دوره‌های آبی کاهش و دمای حداکثر در دوره ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت. همچنین، نتایج حاصل از داده‌های اقلیمی در هر سه مدل اقلیمی و در هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داد که در دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ دوره خشک‌تر و گرم‌تری نسبت به دوره‌های دیگر خواهد بود. به‌منظور بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و با معرفی سری زمانی میانگین بارش و دمای روزانه حاصل از خروجی مدل اقلیمی CanESM5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس SDSM، رواناب و رسوب حوضه کرگانرود به‌صورت ماهانه در ایستگاه هیدرومتری ماشین‌خانه در دوره‌های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ برای دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شبیه‌سازی شد. نتایج مدل SWAT نشان داد، تغییرات رواناب را برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در تمامی دوره‌های آبی کاهش و تغییرات رسوب افزایشی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

با استفاده از نتایج داده‌های خروجی مدل اقلیمی CanESM5 مربوط به گزارش ششم و تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و با به‌کارگیری مدل SWAT، میزان رواناب و رسوب در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، متوسط (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) انجام پذیرفت. مقدار رسوب در نقطه خروجی ایستگاه آب‌سنجی ماشین‌خانه روند افزایشی نشان داد. همچنین، نتایج نشان داد، دبی حادی جریان مشاهداتی با دبی حادی سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره‌های آبی تطابق نداشته ولی رسوب مشاهداتی با دوره‌های آبی تطبیق دارد. داده‌های سناریوی SSP2-4.5 نشان داد که دبی در تمامی دوره‌ها کاهش و رسوب در تمامی دوره‌های آبی افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات دبی مربوط به دوره آبی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۵۶/۷- درصد و کمترین میزان تغییرات دبی مربوط به دوره آبی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و به میزان ۴۸/۵- درصد است. بیشترین تغییرات رسوب مربوط به دوره آبی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و به میزان ۵۴/۳ درصد و کمترین میزان تغییرات رسوب مربوط به دوره آبی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۵/۱۲ درصد است. همچنین نتایج مدل SWAT براساس داده‌های سناریوی SSP5-8.5 نشان داد که دبی در تمامی دوره‌ها کاهش و رسوب در تمامی دوره‌های آبی افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات دبی مربوط به دوره آبی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۵۶- درصد و کمترین میزان تغییرات دبی مربوط به دوره آبی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۵۲/۸- درصد است. بیشترین تغییرات رسوب مربوط به دوره آبی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۱۱۳/۲۷ درصد و کمترین میزان تغییرات رسوب مربوط به دوره آبی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و به میزان ۲۹ درصد است. به‌نظر می‌رسد کاهش بارندگی در دوره‌های آبی باعث کاهش پوشش گیاهی شده و به‌خصوص در اواخر تابستان و اوایل پاییز و با ذوب برف‌های باقی مانده در ارتفاعات به‌دلیل افزایش دما، میزان رواناب تولید شده افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش رسوب تولید شده در حوضه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بارش، حوزه آبخیز کرگانرود، دما، SWAT، SDSM

مقدمه

پدیده به‌دلیل ابعاد علمی و کاربردی (اثرات محیطی، اقتصادی و اجتماعی) آن از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است، چراکه سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر

فرایند تغییر اقلیم، به‌ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی است. این

از طرف دیگر، ناهنجاری‌ها در دما و بارندگی نقش مهمی در صنعت کشاورزی و توسعه سریع کشور ایران ایفاء می‌کند. رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه سریع اقتصادی نشان می‌دهد که ایران با چالش‌های گسترده‌ای در منابع آب قابل دسترس در حال حاضر و به‌ویژه در آینده مواجه است (Afshar et al., 2017).

بنابراین به نظر می‌رسد که مطالعات تغییر اقلیم در حوزه‌های آبخیز ایران توسط مدل‌های اقلیمی با وضوح بالا و به‌ویژه توسط مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم تحت سناریوهای جدید انتشار امری ضروری به نظر می‌رسد. به گونه‌ای که تحقیقات (Afshar et al., 2017)، در رابطه با ارزیابی سالیانه مؤلفه‌های اقلیمی در حوزه آبخیز کشف رود در دوره‌های آتی و با استفاده از گزارش پنجم هیأت بین الدول تغییر اقلیم نشان داد که مؤلفه بارش، روند تغییرات قابل توجه کاهشی و افزایشی متغیری را از خود نشان می‌دهد.

همچنین، دمای متوسط حوضه نیز روند افزایشی قابل توجهی با سطح اعتمادپذیری ۹۰، ۹۹، ۹۹/۹ درصد از خود نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تا انتهای قرن ۲۱ و در مقایسه با دوره تاریخی در تمامی مناطق حوزه آبخیز مطالعاتی و با در نظر گرفتن تمامی مدل‌ها و سناریوها، به‌طور متوسط دمای حوضه بین ۰/۵۶ تا ۳/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش به میزان ۱۰/۷ درصد کاهش می‌یابد.

(Vaghefi et al., 2019)، پژوهشی را در خصوص بررسی مقادیر حدی آینده اقلیمی در ایران انجام دادند. در این پژوهش با استفاده از مجموعه پنج مدل اقلیمی IPSL-CM5A-، HadGEM2-ES، GFDL-ESM2M، LR، MIROC و NoerESM1-M و با دقت بالا برای بررسی حداکثر و حداقل دما و توزیع بارندگی و محاسبه رخداد درجه حرارت بالا (درجه حرارت بالاتر و زیر صدک‌های به ترتیب ۹۵ و ۵) اقدام نمود. نتایج این پژوهش نشان داد با توجه به مقایسه دوره زمانی ۲۰۰۴-۱۹۸۰ با دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۵، دوره‌های طولانی‌تر خشک (برای دوره مساوی یا کمتر از ۱۲۰ روز؛ بارش کمتر از ۲ میلی‌متر، دمای ماکزیمم مساوی یا بیشتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و همچنین شرایط مرطوب (برای دوره مساوی یا کمتر از ۳ روز؛ مجموع بارش مساوی یا

اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌نماید. تغییرات معنی‌دار دمای کره زمین یا گرمایش جهانی به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در قرن حاضر مورد توجه قرار گرفته است (IPCC, 2007). داده‌های هواشناسی و نتایج مدل شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که متوسط دمای اتمسفر در حال افزایش است که خود سبب کاهش مقدار بارش تابستانه و افزایش احتمال و شدت وقوع خشکسالی و امواج حرارتی به خصوص در نواحی خشک و نیمه خشک می‌شود (Chartzoulakis and Psarras, 2005).

از طرف دیگر، با توجه به اینکه انتظار می‌رود پدیده تغییر اقلیم در قرن ۲۱ ادامه یابد (Steele-Dunne et al., 2008)، لذا، پیدایش و تکامل پیوسته انتشار گازهای گلخانه‌ای این اثرات را تشدید خواهد کرد. از این رو به رسمیت شناختن مدیریت منابع آب نقش قاطعی در حمایت از اقتصاد منطقه خواهد داشت (Maurer, 2007). میانگین دما و بارش هوا در سطح زمین و تغییرات آن پارامترهایی از تغییرات اقلیمی هستند که تقریباً در تمامی نظریه‌های تغییر اقلیم، به‌عنوان عوامل اصلی مطرح شده‌اند. با بررسی روند تغییرات میانگین دما و بارش می‌توان تغییرات اقلیمی را مورد بررسی قرار داد. براساس گزارش سوم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، دمای سطح زمین به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای از ۰/۳ تا ۰/۶ درجه سانتی‌گراد در طول قرن گذشته افزایش یافته و پیش بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ مقدار یک تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (Lane et al., 1999).

اعتماد به نتایج مدل‌ها تا حد زیادی متفاوت است و به‌طور عمده به روش‌ها و ساختار سناریوی اقلیمی و مدل هیدرولوژیکی بستگی دارد. با استفاده از داده‌های جهانی اگر دمای کره زمین به میزان یک درجه افزایش یابد، رواناب در مقیاس جهانی چهار درصد افزایش می‌یابد (Kalcic et al., 2015). بارش، به‌عنوان یک عامل کلیدی در تغییر فرکانس و دامنه چرخه هیدرولوژیکی، عواقب جدی در تحولات اجتماعی، اقتصادی و کشاورزی می‌تواند داشته باشد (Najafi and Moazami, 2016).

۲۲/۶۶، ۲۰/۸۳ و ۱۹/۹۳ میلیون تن، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 خواهد رسید.

لذا ورودی‌های زیاد رسوب به‌طور قابل‌توجهی اکوسیستم تالاب انزلی را تخریب کرده و تا حدی حوضه تالاب را پر می‌کند. در نتیجه این تالاب را از فهرست مونتر و کنوانسیون رامسر در مورد تالاب‌های با اهمیت بین‌المللی، خارج می‌کند.

Hariri et al., (2023). مطالعه‌ای را تحت عنوان

تأثیر تغییر اقلیم و بندهای گابیونی بر میزان رسوب خروجی در حوزه آبخیز دهبار، در شهرستان طرقله-شاندیز با استفاده از مدل آماری LARS-WG و مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی SWAT انجام دادند.

نتایج به‌دست آمده از خروجی مدل SWAT با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی نشان داد که قابلیت شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و رسوب در حوزه‌های آبخیز نسبتاً کوچک تا متوسط با شرایط پیچیده مانند حوضه دهبار را حتی با محدودیت داده مشاهده‌ای، دقتی قابل قبول دارد. افزایش مقدار رسوب در نقطه خروجی حوضه با وجود کاهش بارندگی و رواناب، نشان‌دهنده بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد بوده که باعث افزایش شرایط سیلابی می‌شود.

García et al., (2024). در پژوهشی در کشور

مکزیک نسبت به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی جریان حوضه رودخانه میشتکو اقدام نمودند. ابتدا، با استفاده از مدل‌های اقلیمی از مدل‌های جفت شده نسبت به پیش‌بینی عوامل اقلیمی از سال ۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ اقدام و نتایج پیش‌بینی عوامل اقلیمی را در مدل هیدرولوژیکی SWAT وارد نمودند. نتایج به‌دست آمده از خروجی مدل هیدرولوژیکی SWAT نشان داد که دبی جریان رودخانه میشتکو تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۴۷/۴ و ۶۱ درصد کاهش می‌یابد.

هدف از این پژوهش، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای رواناب و رسوب حوزه آبخیز کرگانرود در استان گیلان با استفاده از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) و بر اساس خروجی ریزمقیاس نمائی شده با استفاده از مدل‌های اقلیمی CanESM5، MPI-

بیشتر از ۱۱۰ میلی‌متر) و شرایط بالاتر و فرکانس بالاتر در قسمت جنوبی ایران به احتمال زیاد دوره طولانی‌تر دمای حداکثر را تجربه خواهد کرد.

به‌طور کلی، ترکیب این نتایج، حال و هوای دوره‌های خشک طولانی را که توسط باران‌های شدید متناوب متوقف می‌شود، پیش‌بینی می‌کند. آنها در این پژوهش بیان کرد که بدون ملاحظه به اقدامات سازگاری، برخی از بخش‌های کشور، ممکن است با قابلیت سکونت محدود در آینده روبرو شوند.

هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در ششمین گزارش ارزیابی خود^۱ افزایش میانگین دمای جهانی مشاهده شده را ۱/۰۹ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۲۰-۲۰۱۱ نسبت به آغاز انقلاب صنعتی (۱۹۰۰-۱۸۵۰) را برآورد کرده است (IPCC, 2021). برآورد می‌شود که گرمایش جهانی انسان ساز عواقب بلندمدتی بر تمام اجزای سامانه اقلیمی، از جمله تغییراتی در توزیع بارش روزانه داشته باشد.

برای به تصویر کشیدن تغییرات فرین‌های اقلیمی و به‌خصوص فرین‌های بارشی مدل‌های گردش عمومی جو یک ابزار علمی دقیق و در دسترس در سطح جهانی هستند و به‌عنوان ابزار اصلی برای درک و پیش‌بینی تغییرات در میانگین، وردایی و فرین‌های اقلیمی استفاده می‌شوند. آخرین نسخه این مدل‌ها هم‌اکنون تحت عنوان پروژه مقایسه جفت شده فاز ششم^۲ با طیف گوناگونی در دسترس هستند (Zarin et al., 2022).

Mahdian et al., (2023). پژوهشی را تحت عنوان

مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر دبی جریان و بارهای رسوبی حوزه آبخیز تالاب انزلی به عمل آوردند.

در این پژوهش، با استفاده از مدل SWAT نسبت به بررسی تأثیرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و کاربری و پوشش زمین بر جریان و بار رسوب به تالاب انزلی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که بارش و دمای هوا در سراسر حوزه آبخیز تالاب انزلی تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب کاهش و افزایش خواهند یافت. بنابراین تا سال ۲۱۰۰، کل ورودی رسوب پیش‌بینی شده به تالاب به ترتیب به

² Coupled Model Intercomparison Project Sixth (CMIP6)

¹ Sixth evaluation report (AR6)

۱۶۱ و ۱۲۹ میلی‌متر در ماه‌های اکتبر و سپتامبر اتفاق می‌افتد که هرکدام حدود ۱۵ و ۱۲ درصد از کل بارش را به خود اختصاص می‌دهند. ماه‌های جولای و می خشک‌ترین ماه‌های سال هستند. این حوضه دارای متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت سالیانه این حوضه به ترتیب ۲ و ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت منطقه مطالعاتی و نقشه پایه حوضه در شکل ۱، نشان داده شده است.

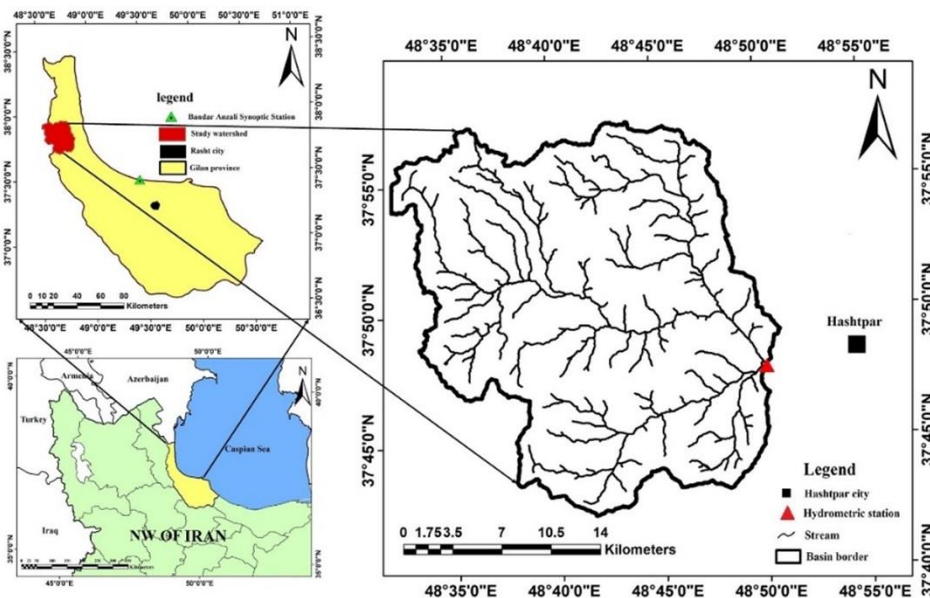
در این پژوهش، داده‌های مشاهداتی روزانه درجه حرارت حداقل و حداکثر، بارش از نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به حوضه آبخیز کرگانرود (ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی) از سازمان هواشناسی استان گیلان و در دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۷۵)، اطلاعات دبی و رسوب تنها ایستگاه هیدرومتری (ایستگاه ماشین خانه) از سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان و در دوره پایه (۲۰۱۶-۱۹۵۷) به دست آمد. همچنین نقشه کاربری اراضی، شیب، اطلاعات جهانی خاک، از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و موسسه تحقیقات خاک و سازمان خواربار و کشاورزی جهانی تهیه شدند.

ESM1.2-HR و NorESM2-MM است. در این پژوهش، پیش‌بینی‌های آبی در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، متوسط (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۰۱۴-۲۰۷۶) در مقایسه با دوره تاریخی (۲۰۰۰-۲۰۰۰) صورت پذیرفت. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، کاربرد مدل گردش عمومی مندرج در گزارش ارزیابی ششم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم با استفاده از خروجی ریزمقیاس نمائی شده توسط مدل ریزمقیاس سازی SDSM6.1 جهت بررسی میزان رواناب و رسوب در حوضه آبخیز کرگانرود در دوره آبی است.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مطالعاتی: محدوده مورد مطالعه حوضه آبخیز کرگانرود با وسعتی حدود ۵۲۵/۴۹ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی $30^{\circ} 48'$ تا $50^{\circ} 48'$ طول شرقی $42^{\circ} 37'$ تا $56^{\circ} 37'$ عرض شمالی در استان گیلان است.

حداقل ارتفاع در ۱۳۹ متر و حداکثر آن در بلندی ۳۲۳۳ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه حوضه آبخیز کرگانرود ۱۰۵۷ میلی‌متر است. همچنین بیشترین بارندگی ماهانه نیز به ترتیب با



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Fig. 1. Geographical location of study area

مرحله تقسیم‌بندی می‌شود. ابتدا مرحله زمین که کنترل کننده میزان ورودی آب، رسوب، عناصر غذایی

شبیه سازی هیدرولوژیکی با مدل SWAT: شبیه سازی جریان دبی و رسوب در مدل SWAT به دو

عدم قطعیت در نتایج مدل از روش SUFI-2 در نرم افزار SWAT-CUP استفاده شده است (Abbaspour, 2007).

فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است (Schaeffli and Gupta, 2007). شاخص‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ارزیابی کمی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 (رابطه ۱) و نش - ساتکلیف (NS) (رابطه ۲) استفاده شده است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات، O_i و P_i مقادیر متناظر مشاهده شده و پیش‌بینی شده هستند، \bar{O} و \bar{P} نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده هستند. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده تا چه میزان به حداکثر مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند.

توابع هدف مختلفی برای بهینه سازی مدل در این نرم‌افزار وجود دارد. تابع هدف نش - ساتکلیف از مهم ترین توابع بوده که توسط بسیاری از هیدرولوژیست‌ها در مدل سازی حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شود و کاربرد آن برای مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده ای (به ویژه در مقیاس ماهانه و سالانه) نسبت به سایر توابع هدف بیشتر توصیه شده است. رابطه NS به قرار زیر است (McCuen et al., 2006).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

که در آن، O مقدار دبی اندازه‌گیری شده و P مقدار دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد. مقدار NS از منفی بی نهایت تا یک متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک (خط با شیب ۱:۱) هماهنگی دارد. تاکنون هیچ معیار خاصی به‌طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه

و آلودگی شیمیایی به کانال اصلی در هر زیرحوضه است و سپس مرحله آب یا فاز روندیایی که کنترل کننده حرکت آب، رسوب و عناصر غذایی و شیمیایی درون شبکه آبراهه اصلی زیرحوضه تا خروجی هر زیر حوضه است. هر زیرحوضه در مدل به زیر مجموعه‌هایی به نام واحد پاسخ هیدرولوژیک تقسیم‌بندی می‌شود که در واقع واحدهای همگن از نظر شاخص‌های خاک، کاربری اراضی و شیب هستند (Afshar et al., 2017).

تحلیل حساسیت^۱، واسنجی^۲ و اعتبارسنجی^۳ مدل SWAT: مدل‌های پیچیده هیدرولوژیک مانند SWAT نیازمند شاخص‌های زیادی برای ارائه توزیع مکانی خصوصیات حوضه هستند. زیرا نه امکان آن وجود دارد و نه معنی‌دار خواهد بود که تمامی پارامترها واسنجی شوند. تحلیل حساسیت به ما کمک می‌کند که شاخص‌هایی که به شدت بر خروجی مدل تأثیرگذارند، شناخته شوند.

تحلیل حساسیت با بررسی شدت تغییرات در خروجی مدل با توجه به ورودی مدل، تشخیص می‌دهد که در کجا تغییرات بزرگ‌تری رخ می‌دهد که نشان دهنده حساسیت مدل است. پارامترهایی که حساسیت بیشتری دارند، باید برای واسنجی استفاده شوند و تا جایی که معیارهای عملکرد اجازه دهند، تصحیح شوند. سودمندی و مورد اعتماد بودن یک مدل حوضه بستگی به این دارد که چگونه واسنجی و سپس اعتبارسنجی شود. واسنجی شامل انتخاب و تصحیح شاخص‌های تأثیرگذار مدل است تا زمانی که خروجی‌های شبیه سازی بر مشاهدات واقعی منطبق شود.

اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده های شبیه سازی شده و مشاهداتی مقایسه می‌شوند، هرچند که تصحیح هیچ پارامتری انجام نمی‌شود و مقایسه داده‌ها در سری زمانی متفاوتی است یا شرایط محیطی است که متفاوت از دوره واسنجی است. نهایتاً اعتبارسنجی اعتماد پذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل تعیین می‌کند. در ARC-SWAT امکانات مستقلی برای تحلیل حساسیت و عملیات واسنجی در نظر گرفته شده است. اما به‌منظور صرفه جویی در وقت و بهبود کیفیت واسنجی و تحلیل

³ Validation

¹ Sensitivity Analysis

² Calibration

مقالات ISI دارد. از مزایای این روش عبارتند از، ۱- همبستگی بین متغیرهای اقلیمی در ضمن کاهش مقیاس حفظ می‌شود که برای مطالعات ارزیابی آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم ضروری است. ۲- با تولید سری‌های طولانی مدت، از عدم قطعیت نوسانات اقلیمی کاسته می‌شود. ۳- در مقایسه با روش‌های دینامیکی، به زمان و هزینه محاسباتی اندکی نیاز دارد. ۴- به‌عنوان یک روش کاهش مقیاس ممکن است محدودیت کاربرد مشخصی داشته باشد و نتایجش در آن حدود، باشد.

مدل SDSM یک ابزار رگرسیون بنیان چندگانه است و امروزه به‌عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس نمایی و بهترین مولد داده شرطی در سطح جهان در چهار مرحله: ۱- انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده به نام متغیر مستقل، ۲- واسنجی مدل، ۳- ارزیابی مدل و ۴- تولید سناریوهای آتی خلاصه می‌شود.

در این پژوهش تمامی خروجی‌های مدل‌های NorESM2-MM و MPI-ESM1.2-HR، CanESM5 جهت مقایسه دقیق بین داده‌های شبیه سازی و مشاهداتی، ریزمقیاس شدند. در پژوهش حاضر برای پیش‌بینی متغیر دما و بارش آینده از مدل CanESM5 تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از طریق مدل SDSM ریز مقیاس نمایی شده است.

ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی: پس از ریزمقیاس نمایی با مقایسه داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی و شبیه سازی شده در دوره پایه، برای صحت سنجی عملکرد مدل‌های اقلیمی از شاخص‌های آماری ضریب تبیین R^2 ، نش - ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

نتایج بحث

پس از اجرای مدل SWAT تعداد ۱۰۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) در پنج زیرحوضه استخراج شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی و همچنین تحلیل عدم قطعیت مدل در بخش‌های زیر آورده شده است.

آنالیز حساسیت پارامترهای مدل: جهت تجزیه و تحلیل حساسیت مدل از الگوریتم SUFI-2 که در قالب نرم‌افزار SWAT-CUP به مدل SWAT لینک می‌شود،

نشده است. اما به‌طور کلی اگر شاخص نش - ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد، مدل عالی و کامل و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، غیرقابل قبول فرض می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970).

مدل و سناریوهای واداشت تابشی در گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم: پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP) با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی مدل‌های گردش عمومی جو به عنوان یک داده مبنا در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم در سطح جهانی توسعه داده شده است برای پاسخگویی به نیازهای علمی و برنامه‌ریزی برای جامعه در حال رشد و غلبه بر اشکالات موجود در مرحله پنجم (CMIP5)، فاز جدید پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده در قالب فاز ششم (CMIP6) معرفی شده است (Zarin and Dadashi, 2022).

مدل‌های فاز ششم (CMIP6) نسبت به فاز قبلی (CMIP5)، ضمن بهبود سازوکار فرایندهای فیزیکی و همرفت طرح‌واره‌های جدیدی را نیز در بخش‌های اقیانوس بیوژئوشیمی اقیانوس و یخ دریا اضافه کرده اند (Eyring et al., 2016). در گزارش ارزیابی ششم (AR6) از نماینده خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای^۱ استفاده می‌شود. سناریوهای جدید انتشار براساس سطح واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ میلادی بنا نهاده شده‌اند. از بین جدیدترین مدل‌های مستخرج از گزارش ششم، مدل‌های اقلیمی CanESM5، MPI-ESM1.2-HR و NorESM2-MM جهت بررسی تغییرات اقلیم آتی پژوهش حاضر، انتخاب شد.

مدل‌های گردش عمومی دارای وضوح نسبتاً پایین بوده و برای مطالعات در سطح منطقه‌ای و محلی مناسب نیست. بنابراین خروجی این مدل‌ها به‌منظور استفاده در مقیاس منطقه‌ای بایستی ریزمقیاس شوند. ریز مقیاس نمایی به‌منظور تجزیه و تحلیل روند هیدرولوژیکی منطقه‌ای، به دو رویکرد دینامیکی و آماری تقسیم بندی می‌شوند.

در میان روش‌های آماری کاهش مقیاس، SDSM بسیار مورد توجه بوده است و بیش از ۶۰۰ ارجاع در

¹ Shared Socioeconomic Pathways in the IPCC Sixth Assessment Report (SSP)

مشاهده‌ای و شبیه سازی شده توجیه می‌شود. براساس نتایج، مقادیر ضرایب فوق برای مؤلفه رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۷۹ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۸ و ۰/۸۱ برآورد شد. همین مقادیر برای مؤلفه رسوب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۸۳ و ۰/۷۶ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۸ و ۰/۸۱ برآورد شد. مقایسه این شاخص‌ها در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی رواناب و رسوب نشان داد که مدل در مرحله اعتبارسنجی ایده‌آل عمل نموده است.

نتایج مدل با توجه به اینکه مقادیر ضریب NS برای رواناب و رسوب بالاتر از ۰/۷۵ است، مدل عالی و کامل است. شکل‌های ۲ و ۳، نشان دهنده میزان همبستگی (R^2) مقادیر شبیه سازی دبی و رسوب با مقادیر مشاهداتی هستند (جدول ۳).

استفاده شد. پس از ۵۰۰ مرحله اجراء شبیه‌سازی درنهایت بیست و دو شاخص در تولید رواناب و شش شاخص در تولید رسوب حوزه آبخیز کرگانرود به‌عنوان شاخص‌های مؤثر شناخته شدند (جدول‌های ۱ و ۲).

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT: با هدف بهبود نتایج شبیه‌سازی دبی حوزه آبخیز کرگانرود، مدل SWAT با توجه به اطلاعات ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه و در مقیاس ماهانه با استفاده از الگوریتم SUFI-2 واسنجی و اعتبارسنجی شد. فرایند واسنجی با استفاده از آمار ۱۲ ساله دبی ماهانه (۲۰۱۱-۲۰۰۰) و اعتبارسنجی آن با استفاده از آمار سه ساله دبی ماهانه (۲۰۱۴-۲۰۱۱) انجام پذیرفت. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از ضرایب R^2 و NS بین داده‌های مشاهداتی و شبیه سازی صورت پذیرفت.

ضریب تبیین (R^2) بیان کننده بخشی از واریانس کل است که به‌وسیله رابطه خطی موجود بین مقادیر

جدول ۱- شاخص‌های مورد استفاده برای کالیبراسیون رواناب در SWAT

Table 1. Parameters used to calibrate runoff in SWAT

Parameter	Parameter Description	Parameter Minimum	Parameter Maximum	Parameter Optimum
R_CN2.mgt	Curve number for moisture condition	-0.16399	0.325549	0.094685
V_ALPHA_BNK.rte	Base flow alpha factor for bank storage	0.000068	0.00016	0.000154
V_CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	0.320509	0.325493	0.320934
V_CH_K2.rte	Main channel conductivity	151.0576	152.6567	151.4846
V_CH_S2.rte	Average slope of main channel	-0.06899	0.160873	0.104714
V_CH_BNK_BD.rte	Bulk density of channel bank	182.708	193.3905	193.087
V_CH_BED_BD.rte	Bulk density of channel bed sediment	0.007557	0.013603	0.008622
R_TLAPS.sub	Temperature lapse rate	0.625146	0.62725	0.62609
V_PLAPS.sub	Precipitation lapse rate	20.24999	20.77142	20.56699
V_SPCON.bsn	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be re entrained during channel sediment routing	0.227192	0.22923	0.227273
V_SPEXP.bsn	Exponent parameter for calculating sediment re entrained in channel sediment routing	21.81382	22.73532	21.96566
R_OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow	-6.83146	-4.33686	-4.77625
R_SURLAG.bsn	Surface runoff lag time	0.446333	0.501293	0.480995
V_SMTMP.bsn	Snow melts base temperature	1.012212	1.020532	1.019161
R_SFTMP.bsn	Snowfall temperature	0.010331	0.010423	0.010406
V_EPCO.bsn	Plant uptake compensation factor	44.04728	50.91389	49.31428
R_ESCO.bsn	Soil evaporation compensation factor	0.282823	0.550409	0.329955
R_USLE_K.sol	USLE equation soil edibility (K) factor	1.272404	1.320081	1.279718
R_RAIN_YRS.wgn	The number of years of maximum monthly 0.5 h rainfall data	1.685901	1.702639	1.685996
R_SLSOIL.hru	Slope length for lateral subsurface flow	74.80408	78.55081	75.63432
R_LAT_TTIME.hru	Sediment concentration in lateral flow and groundwater flow	50.36504	54.01003	52.78813
R_LAT_SED.hru	Lateral flow travel time	3077.733	3147.831	3137.874

SUFI-2 واسنجی و اعتبارسنجی شد. فرایند واسنجی با استفاده از آمار ۱۲ ساله دبی ماهانه (۲۰۱۱-۲۰۰۰) و اعتبارسنجی آن با استفاده از آمار ۳ ساله دبی ماهانه (۲۰۱۴-۲۰۱۱) انجام پذیرفت. ارزیابی کارایی مدل با

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT: با هدف بهبود نتایج شبیه سازی دبی حوزه آبخیز کرگانرود، مدل SWAT با توجه به اطلاعات ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه و در مقیاس ماهانه با استفاده از الگوریتم

استفاده از ضرایب R^2 و NS بین داده‌های مشاهداتی و شبیه سازی صورت پذیرفت. ضریب تبیین (R^2) بیان کننده بخشی از واریانس کل است که به وسیله رابطه خطی موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده توجیه می‌شود. براساس نتایج، مقادیر ضرایب فوق برای مؤلفه رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر $0/87$ و $0/79$ و در مرحله اعتبارسنجی $0/88$ و $0/81$ برآورد شد. همین مقادیر برای مؤلفه رسوب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر $0/83$ و $0/76$ و در مرحله اعتبارسنجی

استفاده از ضرایب R^2 و NS بین داده‌های مشاهداتی و شبیه سازی صورت پذیرفت. ضریب تبیین (R^2) بیان کننده بخشی از واریانس کل است که به وسیله رابطه خطی موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه سازی شده توجیه می‌شود. براساس نتایج، مقادیر ضرایب فوق برای مؤلفه رواناب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر $0/87$ و $0/79$ و در مرحله اعتبارسنجی $0/88$ و $0/81$ برآورد شد. همین مقادیر برای مؤلفه رسوب در مرحله واسنجی به ترتیب برابر $0/83$ و $0/76$ و در مرحله اعتبارسنجی

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده برای کالیبره کردن رسوب در SWAT

Table 2. Parameters used to calibrate sediment yield in SWAT

Parameter	Parameter Description	Parameter Minimum	Parameter Maximum	Parameter Optimum
V_CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.076611	0.035671	-0.071933
V_CH_BNK_BD.rte	Bulk density of channel bank sediment	0.00656	0.008146	0.0066
V_SPCON.bsn	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be re entrained during channel sediment routing	0.626802	0.627696	0.627093
V_SPEXP.bsn	Exponent parameter for calculating sediment re entrained in channel sediment routing	1.374609	1.437176	1.384515
V_ADJ_PKR.bsn	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the sub basin (tributary channels)	0.697247	0.918931	0.809936
V_CH_EQN.rte	Sediment routing method	0	2.030475	0.016921

جدول ۳- مقادیر آماری ارزیابی دقت مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب ماهانه در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی
Table 3. Statistical values of SWAT model accuracy assessment in simulating monthly runoff and sediment in calibration and validation periods

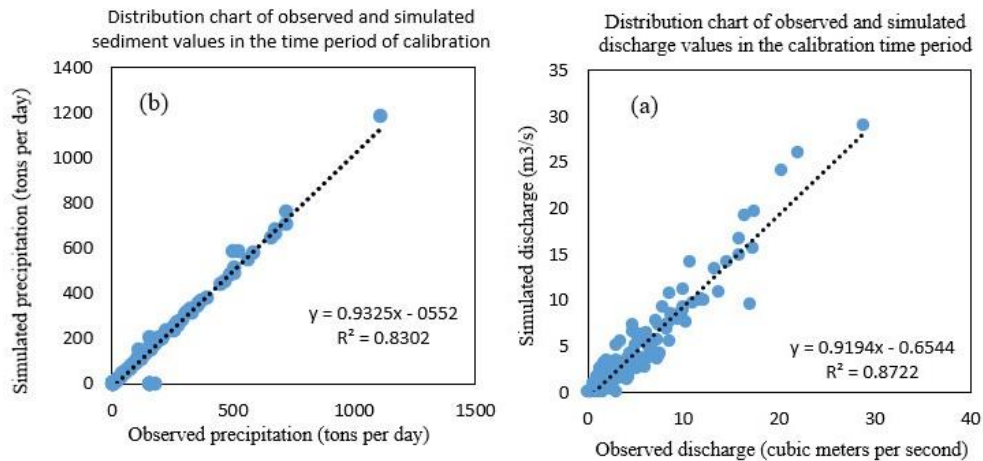
	Calibration				Validation			
	P-factor	R-factor	R^2	NS	P-factor	R-factor	R^2	NS
Flow discharge	0.79	1.02	0.87	0.79	0.67	0.58	0.88	0.81
Sediment	0.88	0.52	0.83	0.76	0.89	0.93	0.88	0.81

دوره به ترتیب برابر $5/16$ و $5/97$ مترمکعب بر ثانیه هستند. در خصوص رسوب، بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل مقادیر رسوب اوج را در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی بیشتر از مقادیر واقعی برآورد نموده است.

همچنین متوسط رسوب ماهانه شبیه سازی شده در طول دوره واسنجی کمتر و اعتبارسنجی بیشتر از دبی ماهانه مشاهداتی است. همچنین، متوسط دبی ماهانه شبیه سازی شده در طول واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر $159/28$ و 64 تن در ماه است، در حالی که این مقادیر برای داده‌های مشاهداتی در این دوره به ترتیب برابر 171 و $62/9$ تن در ماه هستند

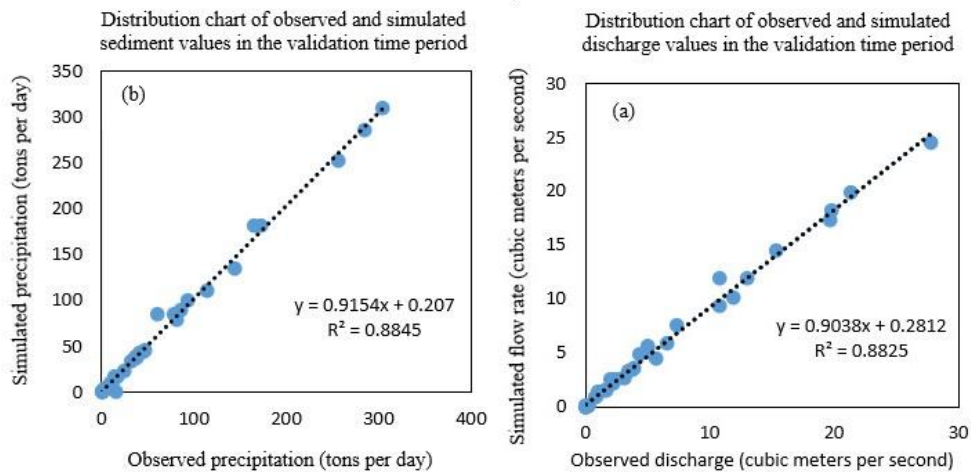
شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷، نشان دهنده کارایی مدل در شبیه سازی دبی و رسوب پایه و اوج و همچنین بررسی انطباق زمانی آنها با داده‌های مشاهداتی در طی فرایندهای واسنجی و اعتبارسنجی است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل مقادیر دبی اوج را در فرایند واسنجی بیشتر از مقادیر واقعی و در فرایند اعتبارسنجی کمتر برآورد نموده است.

همچنین متوسط دبی ماهانه شبیه سازی شده در طول دوره واسنجی بیشتر و اعتبارسنجی کمتر از دبی ماهانه مشاهداتی است. همچنین، متوسط دبی ماهانه شبیه سازی شده در طول واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر $4/95$ و $5/57$ مترمکعب بر ثانیه است، در حالی که این مقادیر برای داده‌های مشاهداتی در این



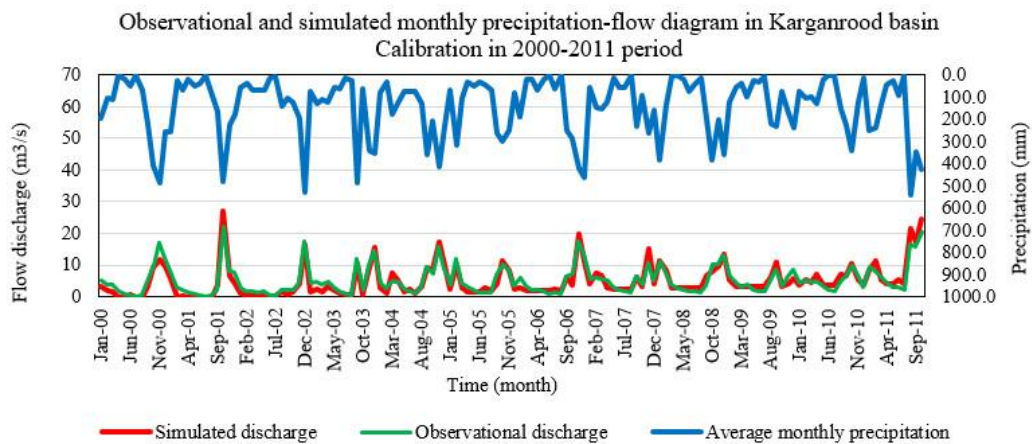
شکل ۲- (a) نمودار مقادیر دبی مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره واسنجی، (b) نمودار رسوب مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره واسنجی

Fig. 2. a) Diagram of the observed and simulated during calibration period, b) Sediment diagram observed and simulated during calibration period.



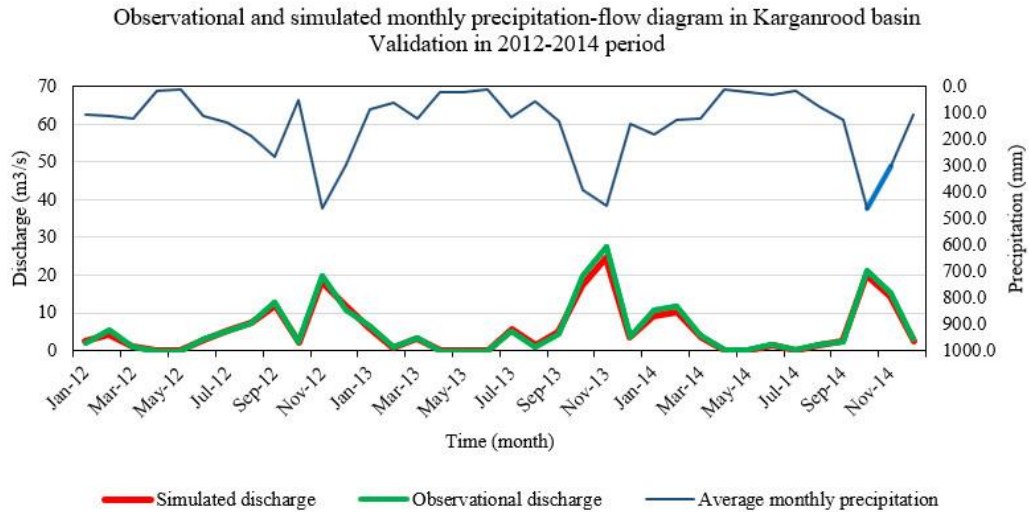
شکل ۳- (a) نمودار مقادیر دبی مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره اعتبارسنجی، (b) نمودار رسوب مشاهده شده و شبیه سازی شده در دوره اعتبارسنجی

Fig. 3. a) Diagram of the observed and simulated discharge values in the validation period, b) Diagram of the observed and simulated sedimentation values in the validation period.



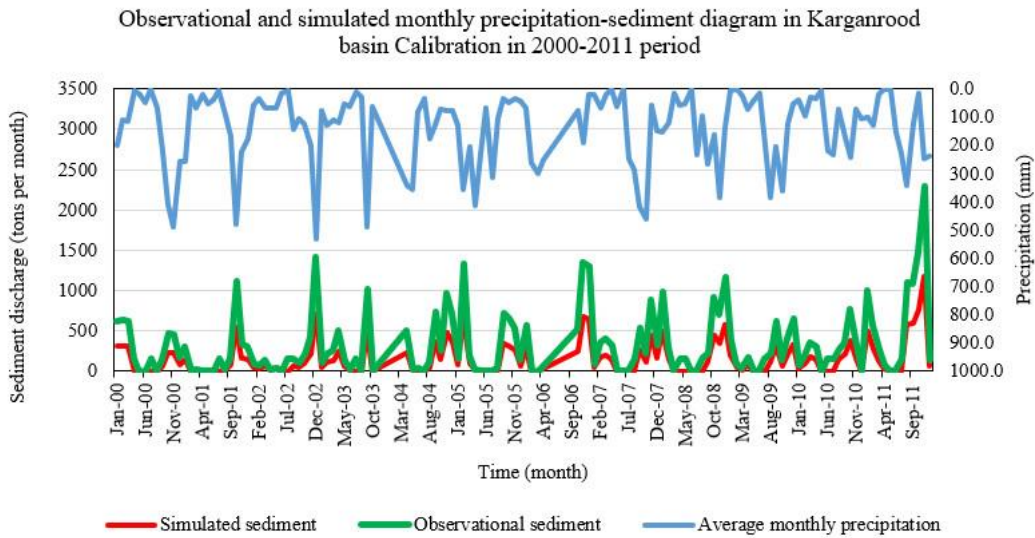
شکل ۴- بارش، جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده ماهانه حوزه آبخیز کرگانرود واسنجی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۱

Fig. 4. Observational and simulated monthly precipitation-flow diagram in Karganrood basin Calibration in 2000-2011 period



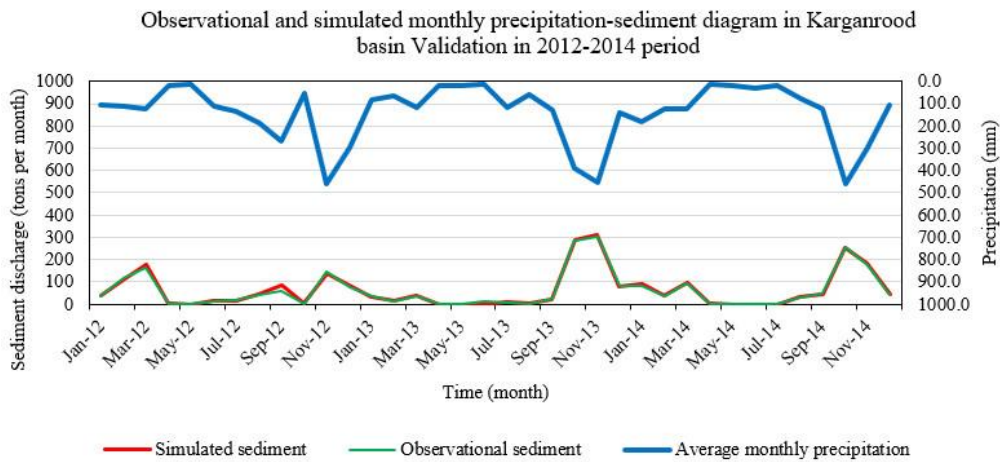
شکل ۵- بارش، جریان مشاهداتی و شبیه سازی شده ماهانه حوزه آبخیز کرگانرود اعتبار سنجی در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۴

Fig. 5. Observational and simulated monthly precipitation-flow diagram in Karganrood basin Validation in 2012-2014 period



شکل ۶- بارش، رسوب مشاهداتی و شبیه سازی شده ماهانه حوزه آبخیز کرگانرود واسنجی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۱

Fig. 6. Observational and simulated monthly precipitation-sediment diagram in Karganrood basin Calibration in 2000-2011 period



شکل ۷- بارش، رسوب مشاهداتی و شبیه سازی شده ماهانه حوزه آبخیز کرگانرود اعتبار سنجی در دوره ۲۰۱۲-۲۰۱۴

Fig. 7. Observational and simulated monthly precipitation-sediment diagram in Karganrood basin Validation in 2012-2014 period

کالیبراسیون ۱۹۹۵-۱۹۷۵ و دوره اعتبارسنجی ۲۰۱۴-۱۹۹۶ با استفاده از مدل پیش بینی کننده ریزمقیاس SDSM با استفاده از مدل های اقلیمی NorESM2-MM و MPI-ESM1.2-HR، CanESM5 در جدول ۵، نشان داده شده است.

نتایج ارزیابی مدل های مبتنی بر مولفه های اقلیمی در تخمین بارش، حداکثر و حداقل دمای ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی نشان داد که مدل های مذکور از کارایی و دقت نسبتاً خوبی برخوردار بوده اند. با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی R^2 ، NS و RMSE، مشخص شد که داده های دما با داده های مشاهده ای نسبت به داده های بارش همبستگی بیشتری دارند.

این به این دلیل است که دما یک متغیر پیوسته است، در حالی که تغییرپذیری کمتری نسبت به بارندگی دارد. اما میزان بارندگی یک مقدار گسسته است و مقدار آن در یک حوضه تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می گیرد. در نتیجه داده های دما نسبت به داده های بارش در دوره های آتی همبستگی بهتری داشتند.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل های اقلیمی: به منظور استفاده از مؤلفه های اقلیمی بارش و دما برای استفاده در مدل های اقلیمی MPI-ESM1.2-HR، CanESM5 و NorESM2-MM، ابتدا شاخص های بارش و دمای ایستگاه های سینوپتیک، اقلیم شناسی و باران سنج استان گیلان تهیه و از آرشیو سازمان هواشناسی ایران پس از بررسی مدت زمان آماری ایستگاه های هواشناسی موجود، مشخص شد که با توجه به کمبود اطلاعات هواشناسی در برخی سال ها در ایستگاه های هواشناسی استان گیلان و همچنین نبود اطلاعات بلندمدت در ایستگاه های هواشناسی موجود؛ بهترین، نزدیک ترین و کامل ترین ایستگاه هواشناسی با دوره آماری طولانی، ایستگاه سینوپتیک بندر انزلی بود.

مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه در استان گیلان در جدول ۴، آمده است. با انتخاب ایستگاه بندر انزلی به عنوان ایستگاه مهم هواشناسی، مؤلفه های اقلیمی بارش و دما در بازه زمانی ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ انتخاب و مقایسه میانگین بلندمدت ماهانه مؤلفه های اقلیمی (بارش، حداکثر و حداقل دما) مشاهده و شبیه سازی شد. ایستگاه سینوپتیک بندر انزلی در دوره های

جدول ۴- جزئیات ایستگاه های هواشناسی مورد مطالعه در استان گیلان

Table 6. Details of meteorological stations studied in Gilan province

Type of weather station	Station name	Starting year	End year	Statistical period length
Synoptic	Bandar Anzali	1975	2018	44
	Astara	1986	2018	33
	Asbehboni	1998	2017	20
Climatology	Pasikhan	1983	2015	33
	Azberam	1990	2018	29
	Gisoom	1999	2019	21
Rain gauge	Khalifabad	2000	2019	20
	Havighe	1960	2019	60
	Talesh	1998	2019	22

روزانه حاصل از خروجی مدل اقلیمی CanESM5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس SDSM، رواناب و رسوب حوضه کرگانرود به صورت ماهانه در ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه در دوره های ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ برای دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شبیه سازی شد.

با توجه به مقادیر به دست آمده از معیارهای ارزیابی R^2 ، NS و RMSE، مشخص شد که مدل اقلیمی CanESM5 از دقت و کارایی بهتری نسبت به مدل های اقلیمی MPI-ESM1.2-HR و NorESM2-MM برخوردار است. به منظور بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و با معرفی سری زمانی میانگین بارش و دمای

جدول ۵- مقایسه عملکرد مدل‌های اقلیمی در سناریوی SSP2-4.5
Table 5. Comparison of the performance of climate models in the SSP2-4.5 scenario

Climatic model	Component	Error of meteorological variables between observed and simulated data of SSP2-4.5 scenario								
		2026-2050			2051-2075			2076-2100		
		R ²	RMSE	NS	R ²	RMSE	NS	R ²	RMSE	NS
CanESM5	Precipitation (mm)	0.86	57.8	0.84	0.84	53.5	0.86	0.89	48.5	0.89
	Max temperature (°C)	0.84	1.6	0.81	0.87	0.61	0.85	0.87	.65	0.85
	Min temperature (°C)	0.87	2.9	0.83	0.87	1.9	0.84	0.87	1.6	0.81
MPI-ESM1.2-HR	Precipitation (mm)	0.81	58.5	0.79	0.8	54.3	0.79	0.79	50.4	0.76
	Max temperature (°C)	0.81	2.5	0.79	0.81	3.5	0.79	0.81	4.2	0.77
	Min temperature (°C)	0.83	2.1	0.81	0.83	1.2	0.83	0.83	1.3	0.83
NorESM2-MM	Precipitation (mm)	0.8	6.9	0.79	0.79	75.3	0.73	0.79	76.1	0.73
	Max temperature (°C)	0.83	2.5	0.77	0.83	1.8	0.78	0.3	1.4	0.81
	Min temperature (°C)	0.83	3.5	0.78	0.83	3.1	0.77	0.83	2.6	0.77

های آتی کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۳۸- درصد (کاهش) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۱۸/۱- درصد (کاهش) است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۱۴ درصد (افزایش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۰/۵ درصد (افزایش) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۷/۹ درصد (افزایش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۰/۷- درصد (کاهش) است.

بررسی نتایج اجرای مدل MPI-ESM1.2-HR نشان می‌دهد که در SSP2-4.5 بارندگی در تمامی دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۳۸/۴۹- درصد (کاهش) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲۱/۵- درصد (کاهش) است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۱۶/۶ درصد (افزایش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲/۶ درصد (افزایش) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۴/۲- درصد (کاهش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۰/۷- درصد (افزایش) است.

نتایج مدل‌سازی تغییر اقلیم: پس از ورود اطلاعات داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی شامل داده‌های دمای حداقل، حداکثر و بارندگی و کوچک مقیاس‌سازی داده‌های مشاهداتی با استفاده از مدل SDSM و دریافت داده‌های دمای حداقل، حداکثر و بارندگی براساس مدل‌های اقلیمی CanESM5، MPI-ESM1.2-HR و NorESM2-MM طی دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، متوسط (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در مقایسه با دوره تاریخی (۲۰۱۸-۱۹۷۵) به شرح زیر حاصل شد.

بررسی نتایج اجرای مدل CanESM5 نشان می‌دهد که در SSP2-4.5 بارندگی در تمامی دوره‌ها کاهش و دمای حداکثر و حداقل در تمامی دوره‌های آتی افزایش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۳۴/۴- درصد (کاهش) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۱۷/۹- درصد (کاهش) است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۲۱/۲ درصد (افزایش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۰/۶ درصد (افزایش) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۳/۵ درصد (افزایش) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۱/۳ درصد (افزایش) است.

همچنین بررسی نتایج مدل CanESM5 در ارتباط با SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بارندگی در تمامی دوره

۱۰/۹ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۰/۵- درصد (کاهشی) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۸/۵ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۰/۷- درصد (کاهشی) است.

همچنین بررسی نتایج مدل MPI-ESM1.2-HR در ارتباط با SSP5-8.5 نشان می‌دهد که بارندگی در تمامی دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۳۴/۵- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و به میزان ۱۹/۹- درصد (کاهشی) است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان

جدول ۶- مقایسه عملکرد مدل‌های اقلیمی در سناریوی SSP2-4.5

Table 6. Comparison of the performance of climate models in the SSP2-4.5 scenario

Model name	Component	Observation 1975-2018	Percentage of changes in average precipitation and maximum, minimum temperature in SSP2-4.5								
			2026-2050		2051-2075		2076-2100				
			Qty.	Change%	Qty.	Change%	Qty.	Change%			
CanESM5	Precipitation (mm)	1686.5	1383.54	-17.9	↓	1207.18	-28.4	↓	1105.33	-34.4	↓
	Max temperature (°C)	19.2	19.32	0.6	↑	20.48	6.6	↑	21.2	10.4	↑
	Min temperature (°C)	14.1	14.29	1.3	↑	14.31	1.4	↑	14.6	3.5	↑
MPI-ESM1.2-HR	Precipitation (mm)	1686.5	1333.2	2.6	↑	1280.6	-34	↓	1037.3	-38.49	↓
	Max temperature (°C)	19.2	19.7	-4.2	↓	20.8	8.3	↑	22.4	16.6	↑
	Min temperature (°C)	14.1	13.5	-24.4	↓	14.6	2.8	↑	14.2	0.7	↑
NorESM2-MM	Precipitation (mm)	1686.5	1274.2	-36.2	↓	1192.1	-29.3	↓	1009.4	-401	↓
	Max temperature (°C)	19.2	19.8	3.1	↑	21.6	12.5	↑	22.3	16.1	↑
	Min temperature (°C)	14.1	13.8	-2.1	↓	13.2	-6.3	↓	13.8	-2.1	↓

جدول ۷- مقایسه عملکرد مدل‌های اقلیمی در سناریوی SSP5-8.5

Table 7. Comparison of the performance of climate models in the SSP5-8.5 scenario

Model name	Component	Observation 1975-2018	Percentage of changes in average precipitation and maximum, minimum temperature in SSP5-8.5								
			2025-2050		2051-2075		2076-2100				
			Qty.	Change%	Qty.	Change%	Qty.	Change%			
CanESM5	Precipitation (mm)	1686.5	1379.8	-18.1	↓	1252.6	-25.7	↓	1044.2	-38	↓
	Max temperature (°C)	19.2	19.3	0.5	↑	20.8	8.3	↑	21.9	14	↑
	Min temperature (°C)	14.1	14	-0.7	↓	14.3	1.4	↑	15.22	7.9	↑
MPI-ESM1.2-HR	Precipitation (mm)	1686.5	1194.7	-29.1	↓	1350.7	-19.9	↓	1104.6	-34.5	↓
	Max temperature (°C)	19.2	19.1	-0.5	↓	19.9	3.6	↑	21.3	10.9	↑
	Min temperature (°C)	14.1	14	-0.7	↓	14.7	4.2	↑	15.3	8.5	↑
NorESM2-MM	Precipitation (mm)	1686.5	1107.5	-34.3	↓	1000.8	-406	↓	956.3	-43.2	↓
	Max temperature (°C)	19.2	16.9	-11.9	↓	18.5	-3.6	↓	20.1	4.6	↑
	Min temperature (°C)	14.1	13.8	-2.1	↓	15.1	7	↑	15.3	8.5	↑

بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۱۶/۱ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۳/۱ درصد (افزایشی) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و به میزان ۶/۳- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره

بررسی نتایج اجرای مدل NorESM2-MM نشان می‌دهد که در SSP2-4.5 بارندگی در تمامی دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۴۰/۱- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲۴/۴- درصد (کاهشی) است.

آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۸/۵ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲/۱- درصد (کاهشی) است.

نتایج شبیه سازی میزان رواناب و رسوب در دوره های آتی: در ادامه با معرفی میانگین سری های زمانی روزانه بارش و دما با استفاده از اقلیمی CanESM5 و با استفاده از مدل ریزمقیاس SDSM6.1، به مدل SWAT، سری های زمانی ماهانه رواناب و رسوب حوزه آبخیز کرگانرود در ایستگاه هیدرومتری ماشین خانه، طی دوره های ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و برای دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شبیه سازی شد.

آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲/۱- درصد (کاهشی) است. همچنین بررسی نتایج مدل NorESM2-MM در ارتباط با SSP5-8.5 نشان می دهد که بارندگی در تمامی دوره های آتی کاهش می یابد. بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ و به میزان ۴۳/۲- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات بارندگی مربوط به دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و به میزان ۳۴/۳- درصد (کاهشی) است.

بیشترین تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۱۱/۹- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات دمای حداکثر مربوط به دوره آتی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و به میزان ۳/۶- درصد (کاهشی) است. بیشترین تغییرات دمای حداقل مربوط به دوره

جدول ۸- مقادیر درصد تغییرات میانگین دبی و رسوب SSP2-4.5 در دوره های آتی

Table 8. Percentage changes in average discharge and sediment SSP2-4.5 in future periods

Component	Observation 2000-2014	Percentage of changes in average discharge and sediment in SSP2-4.5					
		2026-2050		2051-2075		2076-2100	
		Qty.	Change%	Qty.	Change%	Qty.	Change%
Discharge (m ³ /s)	6.44	3.32	-48.5 ↓	3.97	-53.89 ↓	22.792	-56.7 ↓
Sediment (ton)	147.83	155.41	5.12 ↑	228.13	54.3 ↑	227.74	54 ↑

جدول ۹- مقادیر درصد تغییرات میانگین دبی و رسوب SSP5-8.5 در دوره های آتی

Table 9. Percentage changes in average discharge and sediment SSP5-8.5 in future periods

Component	Observation 2000-2014	Percentage of changes in average discharge and sediment in SSP5-8.5					
		2025-2050		2051-2075		2076-2100	
		Qty.	Change%	Qty.	Change%	Qty.	Change%
Discharge (m ³ /s)	6.44	2.88	-52.8 ↓	2.9	-55 ↓	2.84	-56 ↓
Sediment (ton)	147.83	190.75	29 ↑	261.3	76.75 ↑	315.29	113.27 ↑

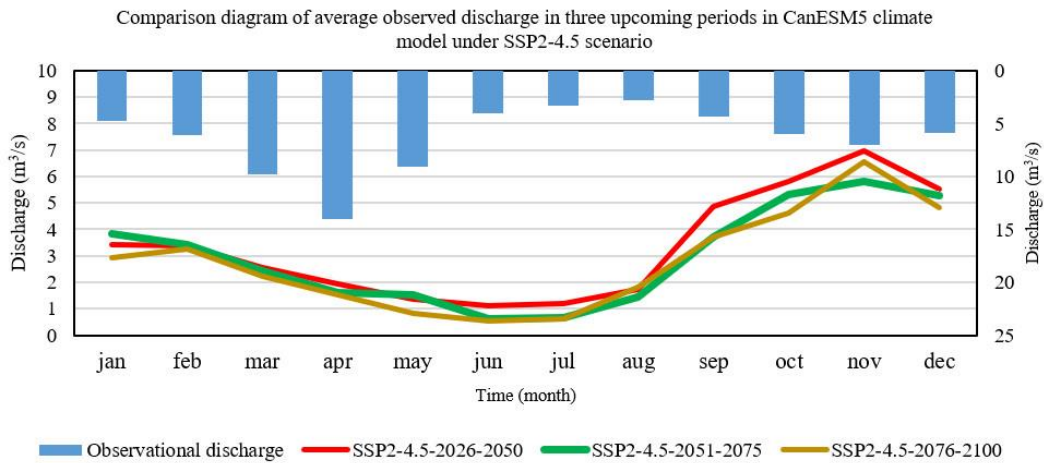
تمامی دوره ها کاهش و رسوب در تمامی دوره های آتی افزایش می یابد. بیشترین تغییرات دبی مربوط به دوره آتی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و به میزان ۵۶- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات دبی مربوط به دوره آتی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و به میزان ۵۲/۸- درصد (کاهشی) است. بیشترین تغییرات رسوب مربوط به دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ و به میزان ۱۱۳/۲۷ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات رسوب مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۲۹ درصد (افزایشی) است (جدول ۹).

مقایسه میانگین دبی و رسوب مشاهده شده در سه دوره آتی در مدل CanESM5 تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در شکل های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

بررسی نتایج اجرای مدل SWAT براساس دادهای سناریوی SSP2-4.5 نشان می دهد؛ دبی در تمامی دوره ها کاهش و رسوب در تمامی دوره های آتی افزایش می یابد. بیشترین تغییرات دبی مربوط به دوره آتی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ و به میزان ۵۶/۷- درصد (کاهشی) و کمترین میزان تغییرات دبی مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۴۸/۵- درصد (کاهشی) است.

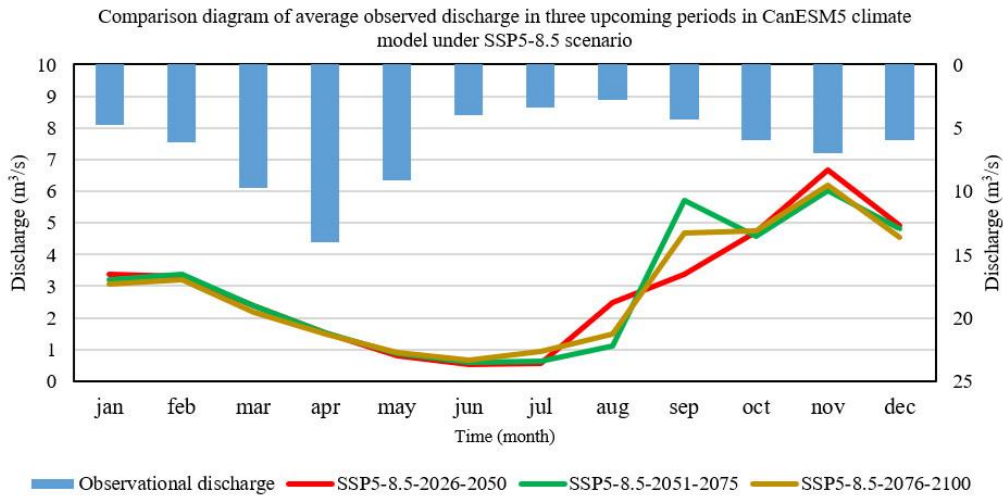
بیشترین تغییرات رسوب مربوط به دوره آتی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و به میزان ۵۴/۳ درصد (افزایشی) و کمترین میزان تغییرات رسوب مربوط به دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و به میزان ۵/۱۲ درصد (افزایشی) است (جدول ۸).

همچنین بررسی نتایج اجرای مدل SWAT براساس داده های سناریوی SSP5-8.5 نشان می دهد؛ دبی در



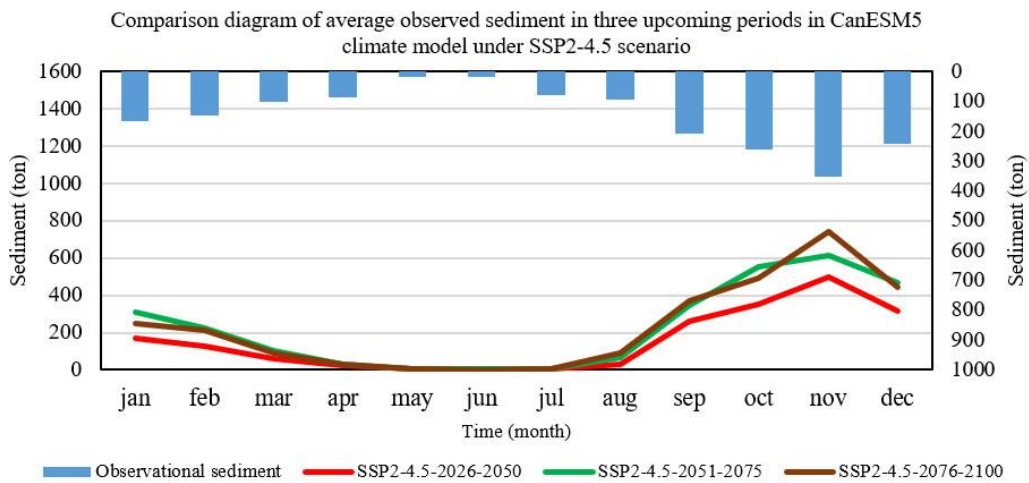
شکل ۸- مقایسه میانگین دبی در سه دوره آتی مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریو SSP2-4.5

Fig. 8. Comparison diagram of average observed discharge in three upcoming periods in CanESM5 climate model under SSP2-4.5 scenario



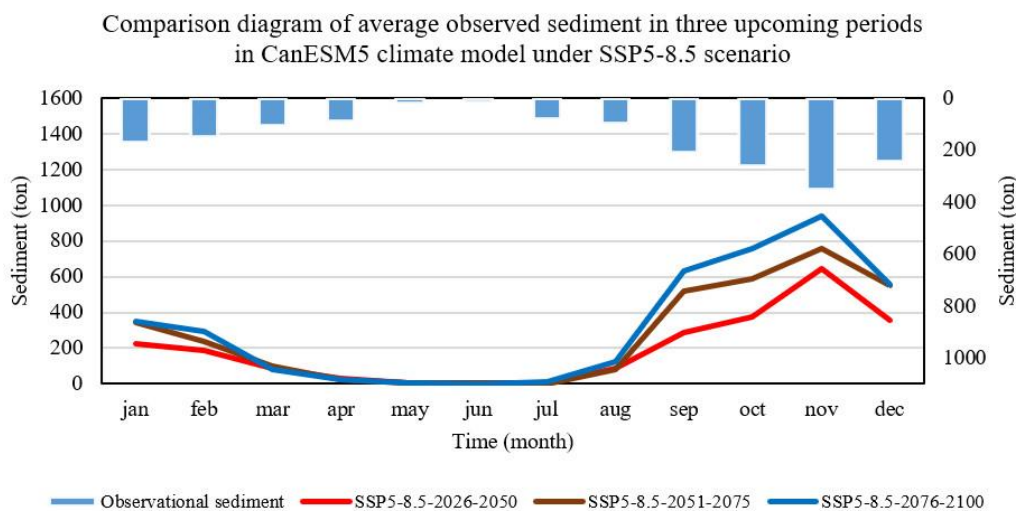
شکل ۹- مقایسه میانگین دبی در سه دوره آتی مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریو SSP5-8.5

Fig. 9. Comparison diagram of average observed discharge in three upcoming periods in CanESM5 climate model under SSP5-8.5 scenario



شکل ۱۰- مقایسه میانگین رسوب در سه دوره آتی مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریو SSP2-4.5

Fig. 10. Comparison diagram of average observed sediment in three upcoming periods in CanESM5 climate model under SSP2-4.5 scenario



شکل ۱۱- مقایسه میانگین رسوب در سه دوره آتی مدل اقلیمی CanESM5 تحت سناریو SSP5-8.5

Fig. 11. Comparison diagram of average observed sediment in three upcoming periods in CanESM5 climate model under SSP5-8.5 scenario

نتیجه گیری

و رسوب حوضه کرگانرود از مدل SWAT استفاده شد. کالیبراسیون، تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی این مدل در نرم افزار SWAT-CUP انجام شد. با جایگزینی داده های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای SSP5-8.5 و SSP2-4.5 برای مدل SWAT، برآورد رواناب و رسوب در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، متوسط (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دوره (۲۱۰۰-۲۰۲۶) انجام پذیرفت و مقدار رسوب با توجه به کاهش رواناب مشاهده شد.

افزایش مقدار رسوب در نقطه خروجی علی رغم کاهش بارندگی و رواناب، نشان دهنده بارش های کوتاه مدت با شدت زیاد بوده که باعث افزایش شرایط سیلابی می شود که این بخش از نتایج با نتایج مطالعه et al., (2023) Hariri، مطابقت نشان داد. همچنین بررسی ها نشان داد که علی رغم عدم تطابق دبی حادی جریان مشاهداتی با دبی حادی سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره های آتی ولی رسوب مشاهداتی با دوره های آتی تطبیق داشته است.

به نظر می رسد با توجه به کاهش بارندگی و همچنین کاهش پوشش گیاهی در اواخر تابستان و اوایل پاییز و نیز ذوب برف های باقی مانده در ارتفاعات به دلیل افزایش دما در دوره های آتی میزان رواناب تولید شده در اواخر تابستان و اوایل پاییز را افزایش داده که این امر باعث افزایش رسوب تولیدی حوضه خواهد شد که این نتایج با پژوهش های (Zhou et al., 2017) et

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر رواناب و رسوب حوضه کرگانرود در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، متوسط (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) مورد بررسی قرار گرفت. برای ریزمقیاس سازی متغیرهای آب و هوایی CanESM5، تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از مدل SDSM6.1 استفاده شد و تغییرات بارش و دما به عنوان دو متغیر نماینده مرتبط با اقلیم مورد مطالعه قرار گرفت. در تمامی سناریوها در هر سه دوره آینده میزان بارش ها کاهش می یابد. در SSP2-4.5، حداقل، حداکثر و میانگین دما در هر سه دوره آینده کاهش می یابد و تنها حداکثر تغییرات دما در دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ ثابت می ماند.

در SSP5-8.5، بیشینه، کمینه و میانگین دما در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ کاهش، کمینه دما در دوره ۲۰۷۵-۲۰۵۱ کاهش و بیشینه، کمینه و میانگین دما در بقیه دوره های آتی افزایش خواهند داشت. نتایج حاصل از داده های اقلیمی در هر سه مدل اقلیمی و در هر دو سناریو SSP5-8.5 و SSP2-4.5 نشان داد که در دوره ۲۰۷۶-۲۱۰۰ دوره ی خشک تر و گرمتری نسبت به دوره های دیگر خواهد بود. این بخش از نتایج با نتایج پژوهش (Mahdian et al., 2023)، مطابقت دارد.

این امر نشان دهنده گرم تر شدن هوای منطقه مورد مطالعه است. افزایش دما و کاهش میانگین بارندگی از اثرات منفی تغییر اقلیم است. برای شبیه سازی رواناب

کیفیت این مقاله نقش مؤثری ایفا نمودند، صمیمانه
مطابقت دارد. (García et al., (2024) و Mahdian al., (2023)
قدردانی می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مجموعه محترم پژوهشکده حفاظت
خاک و آبخیزداری کشور اعم از رئیس، کارشناسان و
کارکنان و نیز سازمان هواشناسی کشور که در ارتقای

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله
مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع مورد استفاده

- Abbaspour, K.C., 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland. (93).
- Afshar, A.A., Y. Hasanzadeh, A., Besalatpour, Pourreza-Bilondi, M., 2017. Climate change forecasting in a mountainous data scarce watershed using CMIP5 models under representative concentration pathways: *Theor. Applied Climat.* (129), 683-699.
- Afshar, A.A., Hassanzadeh, Y., 2017. Determination of monthly hydrological erosion severity and runoff in Torogh Dam watershed basin using SWAT and WEPP models. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civil Engin.* (41), 221-228.
- Chartzoulakis, K., Psarras, G., 2005. Global change effects on crop photosynthesis and production in Mediterranean: the case of Crete, Greece: *Agri. Ecosyst. Environ.* (106), 147-157.
- Das, J., Umamahesh, N., 2015. Multisite downscaling of monsoon precipitation over the Godavari River Basin under the RCP 4.5 Scenario: *World Environmental and Water Resources Congress 2015*. 1066-1075.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Develop.* 9(5), 1937-1958.
- Eyring, V., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Develop.* 9(5), 1937-1958.
- García, G.C., Vélez, E.P., Pérez, A.L., González, M., Magdaleno, H.F., Hernández, R.A., Canales, E.I., 2024. Evaluation of the impact of climate change on the water balance of the Mixteco River Basin with the SWAT Model. *Hydrol.* 1-45.
- Hariri, H., Hosseini, S.A., Khosrojerdi, A., 2023. The effect of climate change and gabion check dams on the amount of sediment yield of basin, case study: Dehbar. *Watershed Engin. Manage.* 4(15), 535-553 (in Persian).
- Kalcic, M.M.I. Chaubey, J., 2015. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries: *Int. J. Agri. Biol. Engin.* (8), 69-80.
- Lane, M.E., Kirshen, P.H., Vogel, R.M., 1999. Indicators of impacts of global climate change on US water resources. *J. Water Res. Plan. Manage.* (125), 194-204.
- Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S.M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., Abolfathi, S., Noori, R., 2023. Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: case study of the Anzali wetland. *Sci. Reports* (13), 5399.
- Maurer, E.P., 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change* (82), 309-325.
- McCuen, R.H., Knight, Z., Cutter, A.G., 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *J. Hydrol. Engin.* (11), 597-602.
- Najafi, M.R., Moazami, S., 2016. Trends in total precipitation and magnitude-frequency of extreme precipitation in Iran, 1969-2009. *Int. J. Climatol.* (36), 1863-1872.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models' part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* (10), 282-290.
- Schaeffli, B., Gupta, H.V., 2007. Do Nash values have value. *Hydrol. Process.* (21), 2075-2080.
- Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., Nolan, P., 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *J. Hydrol.* (356), 28-45.
- Vaghefi, S.A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., Abbaspour, K.C., 2019. The future of extreme climate in Iran. *Scient. Reports* (9), 1-11.
- Zarin, A., Dadashi, R.A.A., 2022. The effect of climate change on Iran's heavy rains using the CMIP6 isothermal model. *J. Water Sustain. Develop.* 8(4) (in Persian).

Zhou, Y., Xu, Y.J., Xiao, W., Wang, J., Huang, Y., Yang, H., 2017. Climate change impacts on flow and suspended sediment yield in headwaters of high-latitude regions-a case study in China's far northeast. *Water* (9), 966.