

Rainfall-runoff prediction using the GR2M hydrological model under Sixth IPCC scenarios: A case study of Lazoreh and Jangaldeh watersheds

Khalil Ghorbani * ¹, Mousa Hesam ², Laleh Rezaei Ghaleh ³, Fariba Niroumandfard ⁴, Meysam Salarijazi ⁵

¹ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran,

² Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³ Graduate Ph.D. in Water Science and Engineering-Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴ Graduate Ph.D. in Water Science and Engineering-Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Birjand University, Birjand, Iran,

⁵ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Climate change, one of the major challenges of the 21st century, has far-reaching impacts on natural systems and human societies. These changes, including changing precipitation patterns, increasing the intensity of droughts and floods, and changing temperatures and evaporation, pose serious uncertainties for the sustainable management of water resources. Runoff, as a key component of the hydrological cycle, plays a vital role in agricultural water supply, groundwater recharge, and river flow, and its disruption has direct consequences for aquatic ecosystems and human livelihoods. Golestan Province, and in particular the Gorganrood Basin, with its geographical and climatic diversity, is considered a region sensitive to climate change. The two sub-basins of Lazoreh and Jangaldeh are of particular importance because they provide significant surface water resources, and the economic and agricultural activities of the region depend on them. In this study, a simple and valid GR2M precipitation-runoff model was used to assess the impact of climate change on monthly runoff. This model, with minimal data requirements, allows for accurate simulation of hydrological processes and analysis of future scenarios. Such a level of research, focusing on sub-basins, will help policymakers and water resource managers design solutions that are adaptable to future climate conditions. These measures will not only help reduce agricultural vulnerability and ensure food security but will also be effective in reducing social tensions caused by water scarcity. Overall, this study aims to provide a scientific and practical understanding of sustainable water resource management in the face of climate change.

Materials and Methods

In the present study, the GR2M precipitation-runoff model was used to simulate monthly runoff. This model is considered a suitable option for analysis at the monthly scale due to its simple structure and minimal data requirements. To predict future climate conditions (2023–2100), the outputs of the ACCESS-ESM1-5 global climate model were used under three scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. These outputs were downscaled with the help of the LARS-WG8 random weather generator to better reflect local characteristics. In order to calibrate and validate the model, daily temperature (minimum and maximum) and precipitation data from the Minudasht evapotranspiration station from 1993 to 2022, and monthly river flow data from two hydrometric stations from 2011 to 2022 were used. Also, potential evapotranspiration was estimated using the Thornthwaite method. Combining observational data, climate projections, and hydrological modeling enabled a more detailed analysis of the impacts of climate change on water resources and provided scientific insights for sustainable water management in the region.

Results and Discussion

The results from the ACCESS-ESM1-5 model output and under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for the future period (2023-2100) show that the average minimum and maximum temperatures in the study area in the future period (2023-2100) under all three scenarios will increase compared to the observation period (1993-2022). The results show that the average minimum temperature in the observation period (1993-2022) is 12.66 °C. While the increase in the average minimum temperature under the SSP1-2.6 scenario in the future period compared to the observation period in the time period (2077-2100) will be 14.28 °C, and under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, the highest increase in the minimum temperature in the time period is also in the time period (2077-2100) at 15.48 and 17.28 °C, respectively. The results show that the average maximum temperature in the observation period is 25.08 °C, but the highest increase in the maximum temperature for all three scenarios, SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, will occur in the final period (2077-2100) at 26.88, 28.07, and 29.89 °C, respectively. The results show that the minimum and maximum temperatures under all three scenarios will increase in the future period compared to the observation period. The precipitation parameter in the observation period is also 441.06 mm, with the highest increase in precipitation compared to the observation period under all three scenarios, SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, in the time interval (2077-2100) being 493.07, 489.53, and 513.75 mm, respectively. The output results of the GR2M model for simulating the flow of the Chehelchay and Narmab rivers at the hydrometric stations of Lazoreh and Jangaldehy during the observation period show that the model performs well in both calibration and validation periods, as shown by the Kling-Gupta values and the root mean square error. The Kling-Gupta efficiency criterion and the root mean square error in the validation period for the Lazore watershed are 0.68 and 14.95, and in the Jangaldehy watershed are 0.68 and 24.52. Therefore, the results in the observational section show that the model performs well in simulating the flow rate. The GR2M model estimated the monthly flow reasonably well, but in some months, there were differences between the observed and simulated values, indicating overestimation or underestimation. The results of future flow predictions under the SSP1-2.6 and SSP2-4.5 scenarios show that after 2040, the river flow will decrease due to increasing temperature, but in the final years, the river changes correspond well to the rainfall fluctuation pattern. In the SSP5-8.5 scenario, it is observed that in the period 2040 to 2060, increasing temperature and precipitation largely caused the flow to increase, but then in the period 2060 to 2100, the flow velocity decreases significantly with increasing temperature and decreasing precipitation.

Conclusion

The results show that climate change, especially under high emission scenarios, will have a negative impact on surface water availability in the two watersheds of Lazoreh and Jangaldehy. This underscores the urgent need for adaptive water management strategies, including improved irrigation efficiency, water allocation planning, and drought preparedness. Furthermore, given the satisfactory performance of the GR2M model in this study, its simplicity, low data requirements, and ease of implementation make it a suitable tool for hydrological modeling and climate impact assessment in other data-scarce basins across Iran and similar regions. This research contributes to the growing body of evidence on climate change impacts in semi-arid regions and provides actionable insights for regional water authorities and policymakers aiming to ensure water security under future climatic uncertainty.

Keywords: Climate Change, CMIP6, GR2M model, Runoff simulation

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research has been conducted at the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources and supported by the Golestan Regional Water Company. The authors are grateful to the Golestan Regional Water Company for the financial support for this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Khalil Ghorbani: Supervision, conceptualization, consultation, and revision of the manuscript; **Mousa Hesam:** Conceptualization, results control; **Laleh Rezaei Ghaleh:** Conceptualization, revision of the manuscript; **Fariba Niroumandfard:** Conceptualization, software/statistical analyses, writing the initial version of the manuscript; **Meysam Salarijazi:** Conceptualization, software/statistical analyses, results control

*Corresponding Author, E-mail: Khalil Ghorbani, Ghorbani.khalil@gau.ac.ir

Citation: Ghorbani, Kh., Hesam, M., Rezaei Ghaleh, L., Niroumandfard, F., & Salarijazi, M. (2026). Rainfall-runoff prediction using the GR2M hydrological model under Sixth IPCC scenarios: A case study of Lazoreh and Jangaldeh watersheds. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(1), 109-131.

doi: 10.22098/mmws.2025.17923.1634

Received: 27 July 2025, Received in revised form: 03 September 2025, Accepted: 03 September 2025, Published online: 21 March 2026

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 1 pp. 109-131.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پیش‌بینی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی GR2M تحت تأثیر سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوزه‌های آبخیز لزوره و جنگلده، استان گلستان)

خلیل قربانی^{۱*}، موسی حسام^۲، لاله رضائی‌قلعه^۳، فریبا نیرومندفرد^۴، میثم سالاری‌جزی^۵

^۱ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آب-منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۴ دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آب-منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۵ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

مدل‌های بارش-رواناب ابزار مهمی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و درک فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند، اما انتخاب آن‌ها نیازمند شناخت محدودیت‌ها و قابلیت‌هاست. در این تحلیل‌ها باید اثر تغییرات اقلیمی، گازهای گلخانه‌ای و نوسانات اقلیمی نیز لحاظ شود تا نتایج به واقعیت نزدیک‌تر باشند. بنابراین، در این پژوهش ابتدا با استفاده از مدل هیدرولوژیکی GR2M به شبیه‌سازی بارش-رواناب ماهانه دو رودخانهٔ چهل‌چای و نرماب در دو حوزهٔ آبخیز لزوره و جنگلده پرداخته شده است. سال‌های آماری (۲۰۱۱-۲۰۲۲) به‌عنوان دورهٔ مشاهداتی مشترک هر دو ایستگاه هیدرومتری و سال‌های (۲۰۲۳-۲۱۰۰) به‌عنوان دورهٔ آینده برای پیش‌بینی دبی جریان تحت جدیدترین سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در نظر گرفته شده است. معیار کارایی کلینگ-گوپتا و میانگین ریشهٔ مربعات خطا در دورهٔ صحت‌سنجی برای حوزهٔ آبخیز لزوره برابر با ۰/۶۸ و ۱۴/۹۵ و در حوزهٔ آبخیز جنگلده برابر با ۰/۶۸ و ۲۴/۵۲ است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل عملکرد خوبی در شبیه‌سازی دبی جریان دارد. در ادامه نتایج پیش‌بینی جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم در آینده نشان می‌دهد که دبی جریان هر دو ایستگاه تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 در بازهٔ زمانی ۲۰۲۰-۲۰۶۰ کاهشی است و در بازهٔ زمانی ۲۰۸۰-۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت. در حالی که دبی جریان هر دو ایستگاه تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در بازهٔ زمانی ۲۰۴۰-۲۰۶۰ روندی افزایشی دارد و در بازهٔ زمانی ۲۰۶۰-۲۱۰۰ روند جریان نیز کاهشی است. در نهایت مهم‌ترین نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تحت هر سه سناریو مورد بررسی مقدار جریان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی به مراتب نسبت به دورهٔ مشاهداتی کاهش خواهد یافت که این موضوع لزوم توجه بیش‌تر به برنامه‌ریزی منابع آب در پایاب این حوضه‌ها را برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی رواناب، تغییر اقلیم، CMIP6، مدل GR2M

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: خلیل قربانی، Ghorbani.khalil@gau.ac.ir

استناد: قربانی، خلیل، حسام، موسی، رضائی‌قلعه، لاله، نیرومندفرد، فریبا و سالاری‌جزی، میثم (۱۴۰۵). پیش‌بینی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی GR2M تحت تأثیر سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوزه‌های آبخیز لزوره و جنگلده، استان گلستان). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۶(۱)، ۱۰۹-۱۳۱.

doi: 10.22098/mmws.2025.17923.1634

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۱۰۹ تا ۱۳۱.

© نویسنندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

یکی از مسائل ضروری در حال حاضر پدیده تغییر اقلیم است (Jiang et al., 2019). تغییر اقلیم بر منابع آب اثر می‌گذارد. با توجه به شدت و مدت، این اثرگذاری منفی در قسمت‌های مختلف می‌تواند متفاوت اتفاق افتد (Motamedvaziri et al., 2020). شناسایی تغییرات اقلیمی و رفتار آن‌ها در آینده و تأثیرات آن در حوضه‌های مختلف به‌ویژه در منابع آب به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی‌های کلان و راهبردی دارای اهمیت زیادی است (Hajimohammadi et al., 2018). با افزایش گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، پدیده خشکسالی و تداوم آن‌ها گسترش یافته است که باعث ایجاد اثرات منفی بر توزیع یکنواخت بارش شده است (Naderi et al., 2018). ارزیابی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر منابع آب به‌خصوص بر رواناب می‌تواند باعث تصمیم‌گیری‌های راهبردی مناسب در مدیریت منابع آب شود و با در نظر نگرفتن این واقعیت که پدیده تغییر اقلیم در حال وقوع است امکان برنامه‌ریزی‌های واقع‌بینانه در زمینه بهره‌برداری از منابع آب در آینده را با مشکل روبه‌رو خواهد کرد (Hardy, 2003). با توجه به این موضوع که میزان رواناب سطحی از مؤلفه‌های اصلی در توسعه پایدار است. بنابراین پیش‌بینی میزان و روند تغییرات آن برای مدیریت منابع آب دارای اهمیت زیادی است. پارامترهای دما و بارش که از عناصر اصلی اقلیمی هستند بر میزان رواناب، آبدی رودخانه‌ها، شدت خشکسالی و سیلاب‌ها اثر می‌گذارند (Goodarzi et al., 2015). بنابراین، با توجه به پدیده تغییر اقلیم و تأثیر آب بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، بررسی مطالعات انجام شده در زمینه اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای هیدرولوژیکی و به‌ویژه رواناب ضروری است. تعیین ارتباط بین بارش و رواناب از مهم‌ترین محاسبات هیدرولوژیکی در یک حوضه است. پارامترهای اقلیمی و فیزیکی حوضه بر میزان تبدیل بارش به حجم رواناب تأثیرگذار است. براساس رابطه پیوستگی، میزان رواناب حاصل از بارندگی برابر با مجموع جبری آب سطحی، نفوذ و تبخیر است. محاسبه نادرست هر کدام از این مؤلفه‌ها باعث نتیجه نادرست در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌شود. امروزه به‌کارگیری مدل‌های بارش-رواناب توسعه یافته و از طریق این مدل‌ها می‌توان به دبی حداکثر، رژیم جریان سطحی در هر نقطه از محدوده مطالعاتی دست یافت. مدل‌های بارش-رواناب برای توصیف رابطه بین بارش و رواناب دارای یک رویکرد ریاضی هستند (Liu et al., 2020). همچنین مدل‌های مفهومی دارای ماهیت یکنواختی هستند و با یکسان در نظر گرفتن پارامترها برای کل حوضه، تغییرپذیری فضایی ویژگی‌های حوضه را نادیده می‌گیرد که هیچ ارتباط معنادار فیزیکی

مستقیمی با اکثر پارامترها ندارد (Lee et al., 2005; Chen et al., 2011; Jaiswal et al., 2020). مدل‌های فیزیکی فرآیندهای فیزیکی را توصیف می‌کنند که نیاز به پارامترهایی در مورد وضعیت اولیه مدل و مورفولوژی حوضه دارند (Devia et al., 2015). مطالعه‌ای توسط Lerat et al., (2024) براساس روشی نوآورانه با نام DAISI¹ (بهبود ساختار مدل آگاهانه جذب داده‌ها) ارائه شد که با ترکیب الگوریتم جذب داده و به‌روزرسانی‌های چندجمله‌ای معادلات حالت، ساختار مدل‌های بارش-رواناب را اصلاح می‌کند. این رویکرد در مدل GR2M و ۲۰۱ حوزه آبخیز در جنوب‌شرقی استرالیا آزمایش شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل اصلاح‌شده در شاخص‌هایی مانند کارایی کلینگ-گوپتا، NSE در جریان لگاریتمی و بایاس منحنی مدت-زمان-جریان عملکرد بهتری نسبت به مدل اصلی دارد و حساسیت رواناب شبیه‌سازی شده به بارندگی نیز افزایش خواهد یافت. در نهایت بیان کردند که با افزودن متغیرهای مشاهده‌ای بیش‌تر مانند تبخیر-تعرق واقعی، می‌توان دقت و محدودیت‌های درونی مدل را بهبود بخشید. (Ndiaye and Ndao., 2024) در پژوهش خود به ارزیابی عملکرد و پایداری مدل GR2M برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه مدیترانه‌ای Medjerda در شمال تونس با داده‌های محدود و تغییرپذیری بالای اقلیمی پرداختند. در این پژوهش سه زیرحوضه با شرایط متضاد اقلیمی برای آزمون انتخاب شدند و فرآیند واسنجی-اعتبارسنجی متناوب میان دوره‌های خشک و مرطوب به‌کار گرفته شد تا استحکام مدل سنجیده شود. سپس، مدل بارش-رواناب GR2M با استفاده از مدل پیش‌بینی اقلیمی MIROC5 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 اجرا و اثرات تغییر اقلیم از طریق شاخص‌های اقلیمی استاندارد (SCI) بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که GR2M توانایی خوبی در بازنمایی جریان رودخانه در شرایط متغیر اقلیمی دارد و حتی در شرایط غیرایستا نیز عملکرد رضایت‌بخش ارائه می‌دهد. با این حال، شبیه‌سازی‌های آینده حاکی از کاهش تدریجی رواناب و افزایش چشم‌گیر رخدادهای خشکسالی شدید است. آن‌ها نتیجه گرفتند که این یافته‌ها بیانگر آسیب‌پذیری بالای حوضه Medjerda در برابر تغییرات اقلیمی و ضرورت برنامه‌ریزی مدیریتی برای سازگاری با شرایط آینده هستند. (Kourtis et al., 2025) پژوهشی را در چارچوبی نوین برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب در حوضه‌های روستایی معرفی کردند و در حوضه رودخانه Platanovrisi در شمال یونان مورد آزمایش قرار دادند. مدل هیدرولوژیکی GR2M با داده‌های بارش، دما و جریان رودخانه توسعه، واسنجی و اعتبارسنجی شد و سپس خروجی سه مدل

ریمقیاس شدند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی رواناب در آینده تحت سناریوهای مذکور به ترتیب به میزان ۱/۷۲، ۴/۸۶ و ۰/۲۵ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دوره مشاهداتی کاهش یافته است. همچنین Niroumandfard et al., (2018b) نیز با استفاده از مدل HBV_Light به شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر جریان سطحی در حوزه آبریز محمدآباد در استان گلستان پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که در دوره آینده، تحت سناریوهای A1B، A2 و B1، کاهش قابل توجهی در میزان رواناب نسبت به دوره پایه رخ می‌دهد. Haghizadeh et al., (2024) در مطالعه‌ای به ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی GR4J، GR2M و GR1A در شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز سیلاخور لرستان پرداختند. نتایج نشان داد هر سه مدل براساس ضریب نش-ساتکلیف در دوره واسنجی و صحت‌سنجی عملکرد خیلی خوبی در شبیه‌سازی بارش-رواناب دارند. اما با توجه به دو معیار RMSE و Bias در مدل GR1A می‌توان نتیجه گرفت این مدل نسبت به دو مدل دیگر در شبیه‌سازی بارش-رواناب از عملکرد بهتری برخوردار است. Mahdavian et al., (2024) اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و رواناب در حوضه کبوی‌چای (زیرحوضه سفیدرود) را مورد بررسی قرار دادند. داده‌های اقلیمی از چهار مدل (EC-EARTH، MIROC5، HadGEM2-ES و MPI-ESM) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و در سه بازه زمانی تا پایان قرن بیست و یکم شبیه‌سازی شدند و سپس با مدل هیدرولوژیکی SWAT تحلیل شدند. نتایج نشان داد که دمای میانگین سالانه افزایش قابل توجهی خواهد داشت و بارندگی نیز روندی افزایشی نشان می‌دهد. با این حال، رواناب حوضه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت که می‌تواند چالش‌های مهمی برای مدیریت منابع آب ایجاد کند. Jafari et al., (2024) در پژوهش خود به بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و رواناب در چهار حوضه آبخیز شرق مازندران پرداختند. برای این منظور داده‌های اقلیمی با استفاده از مدل HadGEM2 تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 شبیه‌سازی و با مدل آماری Lars-WG ریمقیاس شدند. سپس برای شبیه‌سازی جریان رواناب در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) از مدل هیدرولوژیکی IHACRES استفاده کردند. نتایج نشان داد که دمای کمینه و بیشینه در آینده افزایش یافته، اما بارش و به تبع آن رواناب الگوی ثابتی ندارند و تغییرات سالانه می‌تواند متناقض باشد. به طوری که در برخی سال‌ها با وجود افزایش بارش، دبی کاهش یافته و بالعکس. مقایسه میانگین رواناب ۲۰ ساله حاکی از کاهش دبی در سه حوضه تالار، تجن و نکارود و افزایش نسبی در حوضه بالرود (سناریوی RCP2.6) بود. در مجموع نتیجه گرفتند که تغییر اقلیم باعث کاهش جدی منابع آب

اقلیمی تحت دو سناریوی SSP به‌عنوان ورودی در نظر گرفتند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در بازه ۲۰۱۵-۲۰۵۰ بارش سالانه به میزان ۱۳-۲۳ درصد و دبی رودخانه نیز به میزان ۳۲٪-۴۷٪ کاهش یافتند. در حالی که دما به‌طور میانگین حدود یک درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتیجه گرفتند که این تغییرات به کاهش محسوس جریان رودخانه در زمستان و بهار و افزایش جزئی آن در پاییز و تابستان منجر می‌شوند و چنین وضعیتی می‌تواند پیامدهای منفی بر تأمین آب برای برق‌آبی، کشاورزی و نیازهای زیست‌محیطی داشته باشد. در پژوهشی Marshall et al., (2025) با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای گزارش CMIP6، اثرات بلندمدت تغییر اقلیم و شهرنشینی بر منابع آب و کشاورزی در حوزه آبخیز White Oak Bayou در تگزاس را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش داده‌های کاربری و پوشش زمین و بلایای تاریخی را برای درک بهتر پویایی محلی به مدل اضافه کردند. نتایج نشان می‌دهد که تحت سناریوهای بالای انتشار، خطر وقوع سیلاب تا سال ۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت؛ درحالی که گذار از زمین‌های زراعی به پوشش بوته‌ای و جنگلی، سلامت اکوسیستم را بهبود داده و از شدت سیلاب‌ها می‌کاهد. همچنین افزایش رواناب در فصل‌های مرطوب در کنار کاهش آب در فصل‌های خشک می‌تواند کمبود منابع آبی را تشدید کند. در نهایت نتیجه گرفتند که این یافته‌ها چارچوبی علمی و کاربردی برای شناسایی مناطق پرخطر و کمک به مدیریت پایدار آبخیز و سازگاری جوامع محلی با تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کند. Choudhary et al., (2025) در پژوهشی با هدف شبیه‌سازی پویایی آب‌های سطحی-زیرزمینی (SW-GW) در زیرحوضه Godavari در هند از مدل یکپارچه SWAT-MODFLOW همراه با داده‌های اقلیمی CMIP6 استفاده کردند. مدل‌ها با استفاده از الگوریتم SUFI-2 واسنجی و اعتبارسنجی شدند و معیارهای ارزیابی R^2 و NSE نتایج دقیقی از مدل را تأیید کردند. نتایج بیانگر افزایش رواناب در شمال و جنوب زیرحوضه تحت سناریوی SSP5-8.5 و کاهش رطوبت خاک در مناطق مرکزی و شمال‌غربی تحت SSP1-2.6 و SSP2-4.5 است. لذا نتیجه گرفتند این پژوهش اثربخشی رویکرد SWAT-MODFLOW را در ثبت ناهنجاری‌ها و تعامل دینامیک آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان می‌دهد و آن را ابزاری کلیدی برای مدیریت منابع آب معرفی کردند. علاوه بر این، Niroumandfard et al., (2018a) در مطالعه خود به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوزه آبریز محمدآباد در استان گلستان پرداختند. برای این منظور، از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده شده و داده‌های بارش و دما برای دوره آینده با مدل LARS-WG5 تحت سناریوهای اقلیمی A1B، A2 و B1

پرداخته نشده است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی اثر جدیدترین سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم بر جریان رودخانه‌های چهل‌چای و نرماب در ایستگاه‌های هیدرومتری لزوره و جنگله در دوره آینده با مدل GR2M تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پرداخته شده است.

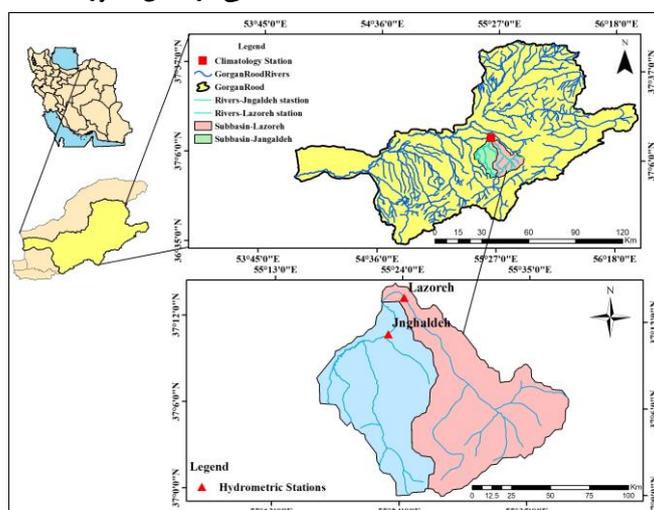
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این مطالعه بخشی از طرح آب منطقه‌ای استان گلستان در زمینه آینده‌پژوهی شبکه آبیاری و زهکشی سد نرماب در دشت گنبد-مینودشت واقع در حوزه آبریز گرگانرود است. لذا در محدوده مطالعاتی شبکه آبیاری و زهکشی طرح نرماب برای بررسی میزان آبدی رودخانه‌های ورودی به شبکه از آمار دبی جریان ماهانه در حوزه آبخیز لزوره و حوزه آبخیز جنگله استفاده شده است. حوزه آبخیز لزوره با مساحت ۲۶۶/۵۷ کیلومترمربع در محدوده طول جغرافیایی "۰۸' ۲۴' ۵۵° و عرض جغرافیایی "۲۷' ۱۳' ۳۷° واقع شده است. ارتفاع این حوضه نسبت به دریا ۱۹۶ متر است. حوزه آبخیز جنگله نیز با مساحت ۲۰۹/۳۸ کیلومترمربع در محدوده طول جغرافیایی "۰۰' ۲۱' ۵۵° و عرض جغرافیایی "۰۰' ۱۰' ۳۷° واقع شده است و ارتفاع این حوضه ۱۸۰ متر از سطح دریا است. برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان آبدی این دو حوضه از ایستگاه تبخیرسنجی مینودشت-لزوره در دوره مشاهداتی استفاده شد. این ایستگاه در موقعیت طول جغرافیایی "۰۵' ۲۴' ۵۵° و عرض جغرافیایی "۳۳' ۱۵' ۳۷° واقع شده است و ارتفاع آن از دریا ۲۰۳ متر است. دمای سالانه و بارش سالانه در دو حوضه به‌طور متوسط به ترتیب ۱۷ درجه سانتی‌گراد و ۸۲۱ میلی‌متر است. منطقه مطالعاتی در شکل ۱ آورده شده است.

در منطقه شده و ضرورت اتخاذ سیاست‌های سازگار با مدیریت پایدار آب را برجسته می‌سازد.

با توجه بررسی مطالعات پژوهشگران می‌توان گفت یکی از دلایل انتخاب مدل GR در مطالعات انجام شده در مقایسه با مدل‌های دیگر به دلیل عواملی هم‌چون در دسترس بودن یک مدل در هر مرحله زمانی، دارای زیرساخت مدل‌سازی یکسان و هم‌چنین دارای عملکرد خوبی نسبت به سایر مدل‌های مفهومی جهانی است (Zamoum and Souag-Gamane., 2019). بنابراین انتخاب مدل‌هایی که با ورودی‌های محدود نتایج قابل قبولی دارند نیز از اهمیت زیادی برخوردار هستند. مدل GR4J نیز مدل بارش-رواناب یکپارچه است که نسخه اصلاح شده از مدل GR3J است و به‌منظور شبیه‌سازی جریان، برنامه‌های کاربردی مانند سیل، پیش‌بینی سیل و خشکسالی کاربرد دارد (Perrin and Michel., 2001). از جمله مطالعاتی که با مدل GR4J انجام شده می‌توان به (Zandi Dareh Gharibi et al., 2017; Mostafazadeh and Asgari et al., 2021) اشاره نمود. مدل GR2M مدلی دو پارامتری بارش-رواناب در بازه زمانی ماهانه است که با غلبه بر ضعف پارامترسازی بیش از حد که توسط مدل‌های دیگر انجام می‌گیرد می‌تواند مدل مناسبی به‌منظور شبیه‌سازی جریان در نظر گرفته شود (Zamoum and Souag-Gamane., 2019). بنابراین در پژوهش حاضر با استفاده از مدل GR2M به شبیه‌سازی جریان ماهانه دو رودخانه چهل‌چای و نرماب در دو ایستگاه هیدرومتری لزوره و جنگله در حوزه آبریز گرگانرود پرداخته شده است. دو حوزه آبخیز لزوره و جنگله به دلیل اهمیت آن‌ها در تأمین آب و مدیریت شبکه آبیاری سد نرماب حساسیت بالایی نسبت به تغییرات اقلیمی دارند. در سایر مطالعات انجام شده به بررسی اثر پدیده تغییر اقلیم بر شبیه‌سازی جریان با مدل بارش-رواناب GR2M در ایران



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در استان گلستان

Figure 1. Location of the study area and meteorological and hydrometric stations in Golestan Province

۲-۲- داده‌های مورد نیاز

در این مطالعه به منظور محاسبه پارامترهای اقلیمی در دوره آینده ابتدا مقادیر پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش ایستگاه تبخیرسنجی مینودشت-لزوره را از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد و برای دوره (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به‌عنوان دوره مشاهداتی مرتب شد. سپس برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در طی سال‌های آینده از مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. همچنین برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG8 استفاده شد. برای اجرای این مدل از داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی در طی دوره آماری ۲۹ ساله از سال (۱۹۹۳-۲۰۲۲) استفاده شد و همچنین پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی آینده طی دوره آماری (۲۰۲۳-۲۱۰۰) انجام شده است. همچنین برای محاسبه جریان از دو حوزه آبخیز جنگله و لزوره در حوزه آبریز گرگانود برای سال‌های مشترک (۲۰۲۲-۲۰۱۱) به‌عنوان دوره مشاهداتی استفاده شد. سپس با استفاده از پارامترهای دما و بارش خروجی از مدل تغییر اقلیم ACCESS-ESM1-5 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 میزان بارش-رواناب در هر دو حوزه آبخیز جنگله و لزوره در طی سال‌های (۲۰۲۳-۲۱۰۰) محاسبه شد.

۲-۳- ریزمقیاس‌نمایی

بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی از جمله مشکلاتی است که در خروجی مدل‌های اقلیمی وجود دارد. همچنین نمی‌توان از اطلاعات خام مدل‌های اقلیمی در پژوهش‌های مرتبط با مقیاس‌های کوچک استفاده نمود. بنابراین باید برای خروجی مدل‌های اقلیمی از روش‌های مناسب ریزمقیاس‌نمایی استفاده کنند (Maraun et al., 2010). مدل‌های اقلیمی (GCM) که برای پژوهش‌های آب و هوایی و پیش‌بینی آب و هوا استفاده می‌شوند نیز اغلب در وضوح فضایی ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر اجرا می‌شوند و توانایی آن‌ها در حل ویژگی‌های مهم مقیاس ریز شبکه مثل جابجایی، حرکت ابرها و همچنین تفاوت‌های توپوگرافی محدود است. دو روش اصلی ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی وجود دارد که شامل روش ریزمقیاس‌نمایی پویا و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری است. در روش ریزمقیاس‌نمایی پویا از خروجی مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود تا مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی شرایط محلی همراه با جزئیات بیشتر از قدرت تفکیک مکانی بالاتری برخوردار شوند. روش ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از روش‌های رگرسیونی و علم آمار و همچنین ایجاد ارتباط کمی بین متغیرهای بزرگ مقیاس و متغیرهای کوچک مقیاس

انجام می‌شود. لذا در این پژوهش به منظور ریزمقیاس‌نمایی از مدل اقلیمی LARS-WG8 استفاده شده است.

۲-۳-۱- مدل LARS-WG8

مدل LARS-WG تولیدکننده تصادفی اطلاعات هواشناسی است که توانایی مدل کردن اطلاعات هواشناسی در یک محل بر اساس اطلاعات فعلی را دارد. اطلاعات فعلی شامل سری زمانی روزانه از پارامترهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تشعشعات خورشید است. داده‌های تولید شده دارای خواص آماری یکسانی با داده‌های دوره تاریخی است با این تفاوت که انحراف معیار آن‌ها نسبت به اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره آینده و تاریخی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نکته‌ای که وجود دارد این است که مولدهای مصنوعی داده‌های آب و هوایی ابزاری برای پیش‌نگری هستند که بتوان در پیش‌نگری آب و هوایی استفاده شوند. با این حال امکان تولید سری‌های زمانی داده‌های آب و هوایی یکسان با دوره دیده‌بانی را دارند. برای انجام مطالعات تغییر اقلیم در یک ایستگاه می‌توان از این روش با شبیه‌سازی و تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی در مقیاس محلی استفاده کرد. مولد مصنوعی، معرف داده‌های آب و هوایی برای که جهت شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط تغییر اقلیم در زمان حال و آینده استفاده می‌شود (Munawar et al., 2021). در این مطالعه از مدل LARS-WG8.0 که از جدیدترین مدل‌های CMIP6 به همراه سناریوهای سری ششم گزارش تغییر اقلیم SSPs استفاده می‌کند، برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در آینده در طی سال‌های ۲۰۲۳-۲۱۰۰ استفاده شد. لذا با استفاده از مدل ACCESS-ESM1-5 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای پیش‌بینی داده‌های دما و بارش ایستگاه تبخیرسنجی مینودشت-لزوره استفاده شده است.

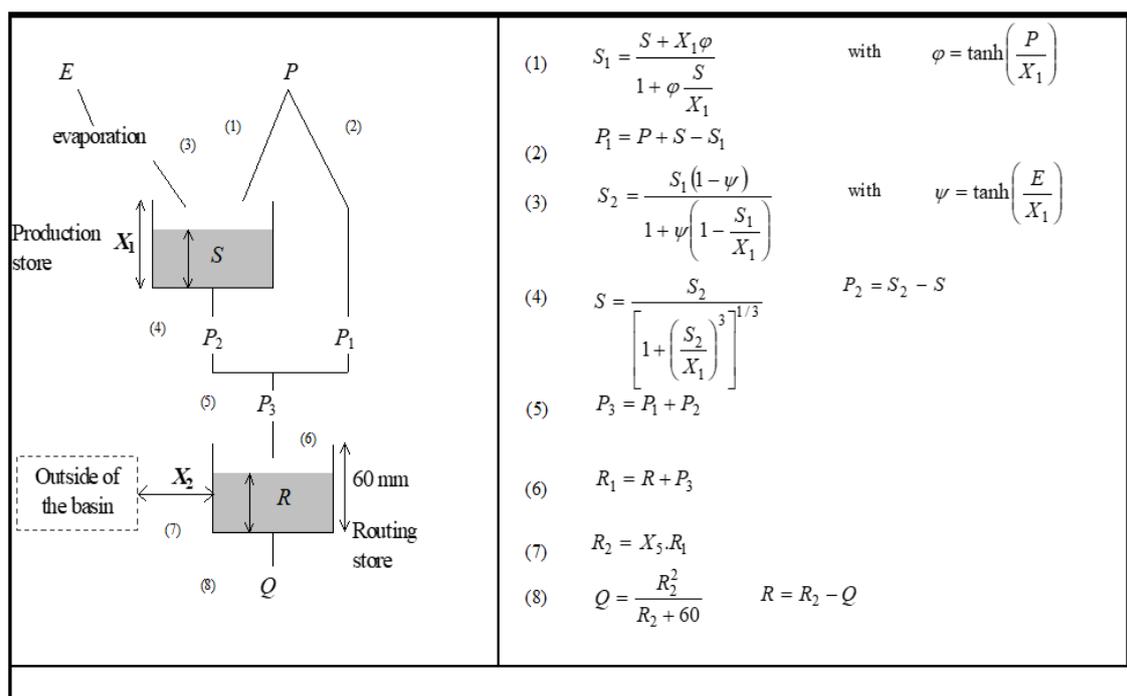
۲-۴- مدل GR2M

مدل GR2M توسط Demagref در دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یک مدل ماهانه بارش براساس یک رویکرد مفهومی معرفی شد. پژوهشگران مختلفی این مدل را توسعه دادند (Kabouya, 1990; Makhoulf and Michel., 1994; Mouelhi, 2003; Mouelhi et al., 2006). داده‌های ورودی این مدل شامل بارندگی ماهانه، تبخیر و تعرق و رواناب است (Nounangnonhou et al., 2018; Fathi et al., 2019).

هدف اصلی این مطالعه، پیش‌بینی رواناب در مقیاس ماهانه است؛ بنابراین انتخاب مدلی که مستقیماً دینامیک تجمعی حوضه را در این بازه زمانی شبیه‌سازی کند، منطقی و هم‌راستا با سوال پژوهش است. مدل GR2M به‌طور ویژه برای برآورد رواناب ماهانه

کوتاه و اطلاعات محدود کاهش می‌دهد و شناسایی‌پذیری پارامترها را بهبود می‌بخشد (Kourtis et al., 2025). ساختار گرافیکی مدل در شکل ۲ ارائه شده است. در مخزن بالا پارامترهای X_1 و S به ترتیب بیانگر حداکثر رطوبت خاک و رطوبت واقعی خاک هستند. حداکثر ظرفیت ذخیره پایینی جریان رودخانه (R) ۶۰ میلی‌متر است که تغییرات آن وابسته به ضریب تبادل آب (X_2) است.

توسعه یافته و با استفاده از ورودی‌های محدود شامل بارش، تبخیر-تعرق و رواناب مشاهداتی، از نیاز به داده‌های مکانی دقیق خاک و پوشش/کاربری زمین اجتناب می‌کند. این ویژگی، از ورود عدم قطعیت ناشی از داده‌های مکانی کم‌اطمینان جلوگیری می‌نماید. همچنین، تعداد اندک پارامترهای GR2M ریسک ناپایداری، هم‌ارزی راه‌حل‌ها و بیش‌برازش را در شرایط طول سری



شکل ۲- ساختار گرافیکی و فرآیندهای شبیه‌سازی جریان مدل GR2M
Figure 2. Graphical structure and flow simulation processes of the GR2M model

R به R_1 افزایش پیدا کند. سپس مقدار R_1 در اثر تبادلات آب زیرزمینی با بیرون سطح حوضه به مقدار R_2 کاهش می‌یابد. میزان این ضریب در حوضه‌های تغذیه‌کننده منابع آب زیرزمینی در صورت وجود ایستگاه هیدرومتری دارای اندازه کم‌تر از یک است و در حالت وجود زهکش جریان‌ات زیرقشری و آب زیرزمینی خارج از حوضه میزان آن بیش‌تر از یک است و در نهایت در حالت نداشتن تبادل جریان برابر با یک است. بیش‌ترین میزان ظرفیت مخزن روندیابی ۶۰ میلی‌متر است که تخلیه آن باعث ایجاد عمق جریان خروجی از حوضه برابر با Q می‌شود (Ditthakit et al., 2023; Mouelhi et al. 2006).

۲-۵- معیارهای ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل GR2M در شبیه‌سازی بارش-رواناب معیار کارایی ضریب تبیین (R)، کلینگ-گوپتا (KGE)، میانگین ریشه مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب نش-

در این مدل فرض بر آن است که حوزه آبریز دارای حداکثر ظرفیت پذیرش رطوبت (در لایه‌های خاک) به میزان X_1 است. بنابراین در هنگام زمان آغاز شبیه‌سازی جریان مقدار ذخیره رطوبتی حوضه برابر با S است. زمانی که بارش (P) رخ می‌دهد بخشی از آن به درون زمین نفوذ کرده و باعث افزایش ذخیره رطوبتی S_1 می‌شود و بخشی دیگر که نفوذ نمی‌کند به جریان سطحی تبدیل می‌شود ψ . ارتفاع ذخیره رطوبتی حوضه از S_1 به S_2 با توجه به میزان تبخیر و تعرق پتانسیل کاهش می‌یابد. از طریق مقدار ذخیره رطوبتی S_2 ، ارتفاعی برابر P_2 برای تبدیل شدن به جریان زیرقشری و اضافه شدن به ذخیره آب زیرزمینی حاصل از زهکش شدن به آبراهه و یا برای مصرف به لایه‌های زیرین نفوذ خواهد کرد و در نهایت سطح رطوبت خاک را به میزان S می‌رساند. پارامتر P_3 میزان کل آبی است که به صورت جریان سطحی و جریان زیرقشری به بستر آبراهه نشت می‌کند. در ادامه این جریان باعث می‌شود تا تراز مخزن روندیابی از وضع موجود

۳-۲- پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در آینده

پارامترهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش با استفاده از خروجی مدل ACCESS-ESM1-5 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۳-۲۱۰۰) توسط LARS-WG8 ریزمقیاس شدند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین دمای حداقل و دمای حداکثر در هر سه سناریو در آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) افزایش خواهد یافت. به طوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود که میانگین دمای حداقل در طی دوره مشاهداتی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به طور متوسط برابر با ۱۲/۶۶ درجه سانتی‌گراد است که این پارامتر در دوره‌های آینده تحت سناریوی SSP1-2.6 در سال‌های (۲۰۲۳-۲۰۴۹)، (۲۰۵۰-۲۰۷۶) و (۲۰۷۷-۲۱۰۰) به ترتیب به میزان ۱۳/۹۶، ۱۴/۲۲ و ۱۴/۲۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. همچنین افزایش مقادیر دمای حداقل در آینده در سه بازه زمانی آینده مذکور تحت سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب ۱۴/۷۱، ۱۴/۷۹ و ۱۵/۴۸ درجه سانتی‌گراد است و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در این سه بازه زمانی برابر با ۱۵/۶۸، ۱۵/۶۶ و ۱۷/۲۸ درجه سانتی‌گراد است که نسبت به دو سناریوی دیگر شاهد افزایش بیش‌تری از دمای حداقل نسبت به دوره مشاهداتی خواهیم بود. نتایج پارامتر دمای حداکثر در شکل ۴ نشان می‌دهد که در مقدار این پارامتر در دوره مشاهداتی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) ۲۵/۰۸ درجه سانتی‌گراد است. اما در آینده تحت سناریوی SSP1-2.6 در بازه‌های زمانی (۲۰۲۳-۲۰۴۹)، (۲۰۵۰-۲۰۷۶) و (۲۰۷۷-۲۱۰۰) به ترتیب به طور متوسط به میزان ۲۶/۵۸، ۲۶/۹۴ و ۲۶/۸۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. مقدار این پارامتر در آینده تحت سناریوی SSP2-4.5 در سه بازه زمانی مذکور نیز به ترتیب ۲۷/۲۰، ۲۷/۳۰ و ۲۸/۰۷ درجه سانتی‌گراد است و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 نیز به مقدار ۲۸/۲۲، ۲۸/۱۷ و ۲۹/۸۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. مقادیر میانگین مجموع بارش‌های سالانه در شکل ۵ نیز آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط میانگین مجموع بارش‌های سالانه در دوره مشاهداتی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) برابر با ۴۴۱/۰۶ میلی‌متر است. در سه دوره آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۹)، (۲۰۵۰-۲۰۷۶) و (۲۰۷۷-۲۱۰۰) نیز تحت سناریوی SSP1-2.6 به ترتیب به مقدار ۴۷۴/۷۵، ۴۸۰/۸۴ و ۴۹۳/۰۷ میلی‌متر محاسبه شده است. همچنین متوسط میانگین بارش سالانه در دوره‌های مذکور تحت سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب برابر ۴۸۳/۹۶، ۴۷۵/۵۳ و ۴۸۹/۵۳ میلی‌متر و تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 برابر ۴۹۰، ۴۹۳/۲۱ و ۵۱۳/۷۵ میلی‌متر است. مشاهده می‌شود که بارش به طور متوسط نسبت به دوره مشاهداتی در ایستگاه تبخیرسنجی مینودشت-لرزه افزایشی است. به طور کلی

ساتکلیف (NSE) استفاده شد. مقدار یک نشان‌دهنده حالت بهینه کارایی کینگ-گوپتا است در حالی که برای ریشه میانگین مربعات خطا مقدار صفر نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل است. ضریب نش-ساتکلیف NSE مقادیر بین منفی بی‌نهایت تا یک را شامل می‌شود و مقدار یک نیز بهینه‌ترین حالت این معیار است و مقادیر منفی بیان‌کننده این هستند که به کارگیری میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده از میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده متغیر موردنظر بهتر است. کاربرد این معیارها در مطالعات متعددی در زمینه مهندسی منابع آب مورد توجه قرار گرفته است (Zhou et al., 2024; Salarijazi et al., 2024).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + \left(\frac{SD_{Q_f}}{SD_{Q_o}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_f}{\bar{Q}_o} - 1\right)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{f,i} - Q_{o,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right] \quad (4)$$

در روابط فوق، $Q_{f,i}$ دبی برآورد شده در گام زمانی i ، $Q_{o,i}$ دبی مشاهده شده در گام زمان i ، n تعداد داده‌ها، R ضریب همبستگی، SD انحراف معیار است و پارامترهای X_i و Y_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی توسط مدل و مشاهداتی است. \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب معرف میانگین داده‌های پیش‌بینی شده و میانگین داده‌های مشاهداتی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی مدل LARS_WG

به منظور تأیید عملکرد مدل LARS_WG8.0 در طی دوره صحت‌سنجی از آزمون‌های آماری K-S، t و F استفاده شد. آزمون K-S برای آزمایش برابری توزیع‌های فصلی تر و خشک، توزیع روزانه بارندگی و توزیع روزانه دمای حداقل و حداکثر انجام شد. بررسی برابری انحراف معیار بارندگی با آزمون F صورت گرفت و برای ارزیابی برابری میانگین ماهانه بارندگی، دمای حداقل و حداکثر نیز از آزمون t استفاده شد. مقادیر P_value حاصل از تمام این آزمون‌ها نشان از عدم اختلاف معنادار در سطح ۵ درصد بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دارد. بنابراین، نتایج در جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل LARS_WG8.0 در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی در ایستگاه تبخیرسنجی مینودشت-لرزه در منطقه مطالعاتی مورد نظر دارای سازگاری قابل‌قبولی بین سری مشاهداتی و سری شبیه‌سازی شده است (Hajarpour et al., 2014; Rasuli et al., 2014).

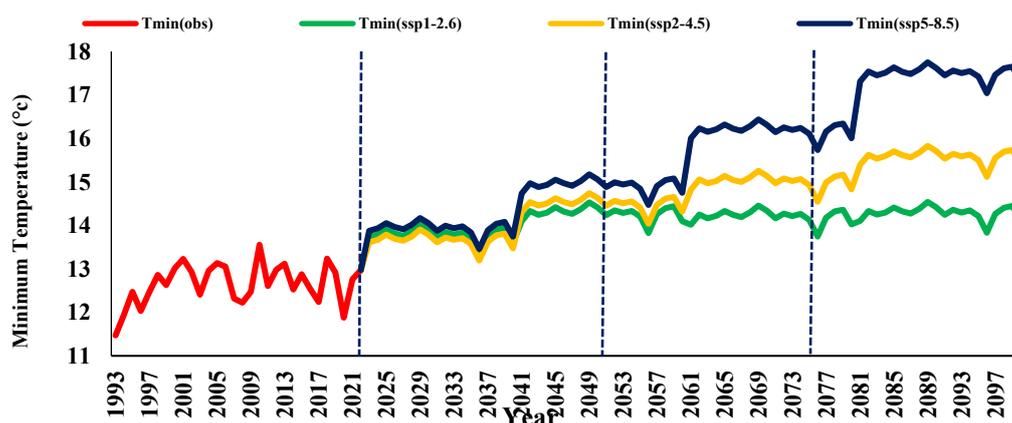
در بخش‌های مختلف ایران توسط Zarrin et al. (2021); Usta et al. (2022) و Niazkar et al. (2023) مورد تأیید است.

نتایج این بخش نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر و همچنین بارندگی تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در دوره زمانی (۲۰۷۷-۲۱۰۰) اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از این بخش از پژوهش حاضر با مطالعات انجام شده

جدول ۱-آزمون K-S توزیع روزانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

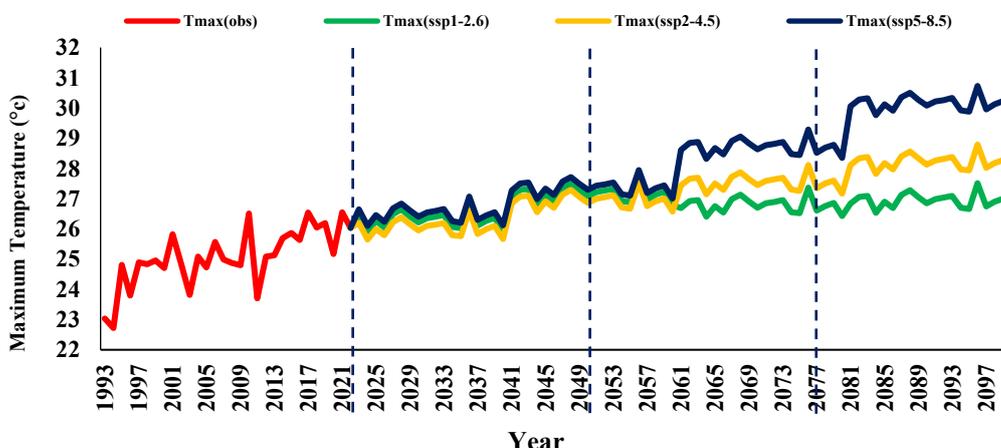
Table 1. K-S test daily distribution of observational and simulated data

Month	Rain(mm)		Minimum temperature (°C)		Maximum temperature (°C)	
	P-Value	K-S	P-Value	K-S	P-Value	K-S
January	0.988	0.126	1	0.053	1	0.053
February	1	0.047	1	0.053	1	0.053
March	1	0.056	1	0.053	1	0.053
April	1	0.053	1	0.010	1	0.053
May	1	0.046	1	0.053	1	0.053
June	0.337	0.266	1	0.053	1	0.053
July	1	0.036	1	0.053	1	0.053
August	1	0.056	1	0.053	1	0.053
September	0.978	0.134	1	0.053	1	0.053
October	1	0.040	1	0.053	1	0.053
November	1	0.051	1	0.053	1	0.053
December	1	0.057	1	0.053	1	0.053



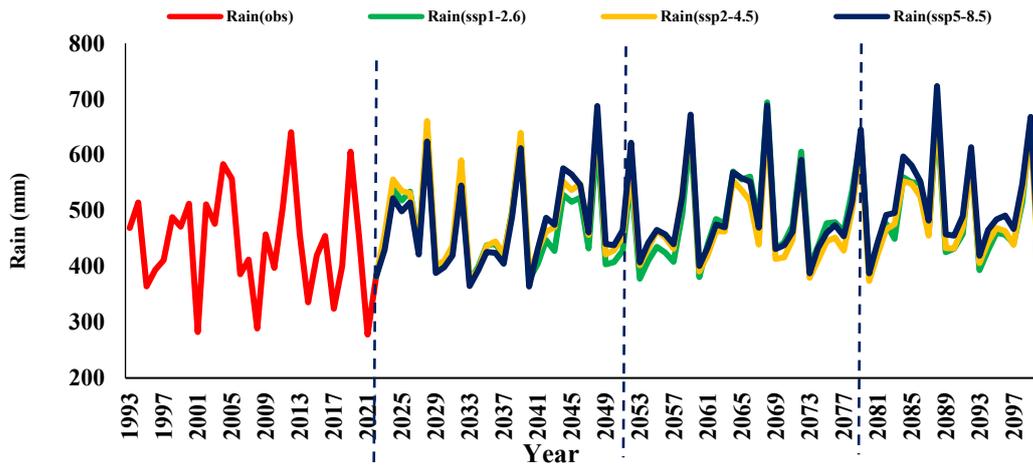
شکل ۳- مقایسه میانگین سالانه دمای حداقل حوضه مورد مطالعه در آینده نسبت به دوره مشاهداتی

Figure 3. Comparison of the annual average minimum temperature of the studied basin in the future compared to the observation period



شکل ۴- مقایسه میانگین سالانه دمای حداکثر حوضه مورد مطالعه در آینده نسبت به دوره مشاهداتی

Figure 4. Comparison of the annual average maximum temperature of the studied basin in the future compared to the observation period

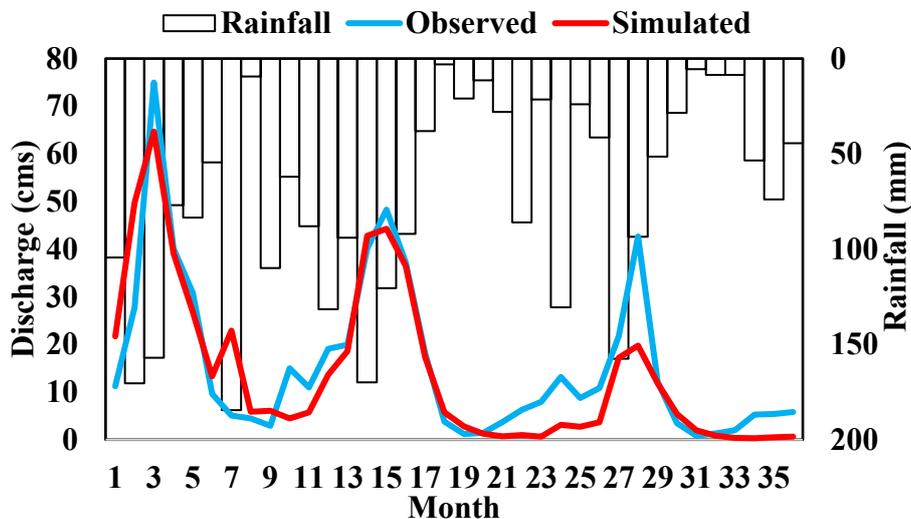


شکل ۵- مقایسه میانگین مجموع بارش سالانه حوضه مورد مطالعه در آینده نسبت به دوره مشاهداتی

Figure 5. Comparison of the average total annual precipitation of the studied basin in the future compared to the observation period

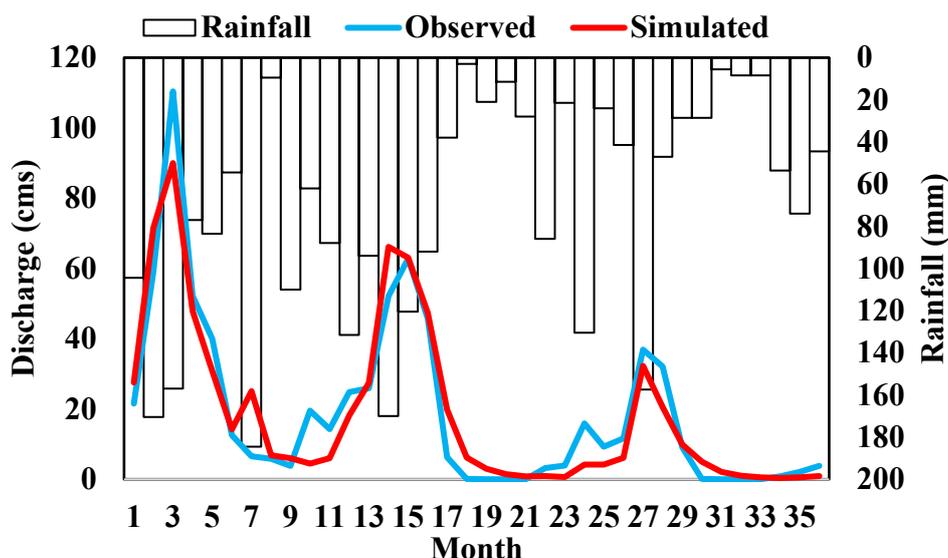
نمودارهای سری زمانی مدل‌سازی در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگله در مرحله واسنجی ارائه شده است. نمودارهای مذکور نشان می‌دهد که مدل GR2M به شکل مناسبی در دوره واسنجی آموزش دیده است. در حوزه لزوره یک رفتار کم برآوردی نسبتاً محدود در ماه‌های با حداکثر رواناب قابل مشاهده است. این مشکل در حوزه آبخیز جنگله آشکار نیست. مهم‌ترین علت این مشکل می‌تواند ناشی از موقعیت ایستگاه باران‌سنجی نسبت به ایستگاه مورد نظر باشد. با توجه به جدول ۲ مقادیر ضریب تبیین، میانگین ریشه مربعات خطا، معیار کارایی کلینگ-گوپتا و نش-ساتکلیف برای دوره واسنجی در حوزه آبخیز لزوره برابر با ۰/۸۰، ۷/۷۶، ۰/۸۵ و ۰/۷۸ و در حوزه آبریز جنگله برابر با ۰/۷۷، ۰/۹۳ و ۰/۶۹ است. بنابراین مشخص است که مدل در مرحله واسنجی به شکل مناسبی آموزش دیده است. این مقادیر در تطابق با نمودارهای سری زمانی جریان رودخانه مشاهده و شبیه‌سازی شده است.

۳-۳- نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب در دوره مشاهداتی
با در نظر گرفتن داده‌های دما، مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه با روش تورنت-وایت برآورد شد. با استفاده از داده‌های برآورد شده تبخیر و تعرق بالقوه و نیز داده‌های بارش ثبت شده، مدل GR2M برای مدل‌سازی بارش-رواناب، بر مبنای دو پارامتر x_1 -ظرفیت تولید و x_2 -پارامتر تبادل، واسنجی شد. برای هر دو حوزه آبخیز جنگله و لزوره یک دوره ۳۶ ماهه برای راه‌اندازی، یک دوره ۳۶ ماهه برای واسنجی و یک دوره ۷۲ ماهه برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر در مجموع از داده‌های ۱۲ سال (۲۰۱۱-۲۰۲۲) در مقیاس ماهانه برای مدل‌سازی در دو حوضه مورد مطالعه استفاده شد. در هر دو مرحله، شرایط هیدرولوژیکی متنوع شامل دوره‌های خشک و تر وجود داشت و از این‌رو فرآیند ارزیابی به یک وضعیت خاص محدود نشد. در این بازه، داده پرت آشکاری شناسایی نشد و صحت داده‌های مشکوک پس از بررسی دقیق و تأیید کارشناسان مورد استفاده قرار گرفت. در شکل‌های ۶ و ۷



شکل ۶- سری زمانی شبیه‌سازی ماهانه بارش-رواناب در مرحله واسنجی مدل GR2M (حوزه آبخیز لزوره)

Figure 6. Monthly rainfall-runoff simulation time series in the calibration phase of the GR2M model (Lazoreh watershed)



شکل ۷- سری زمانی شبیه‌سازی ماهانه بارش-رواناب در مرحله واسنجی مدل GR2M (حوزه آبخیز جنگلده)

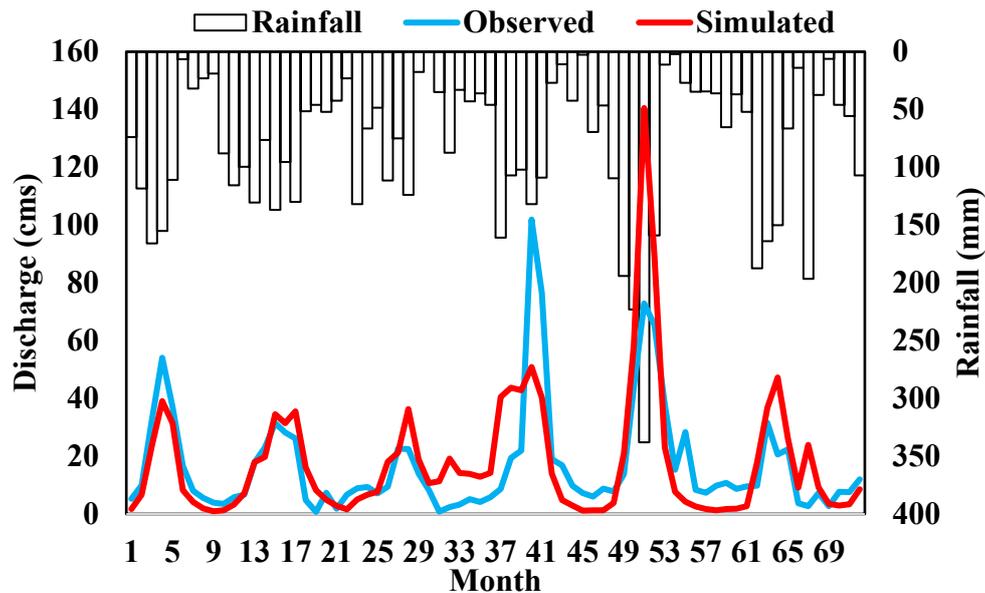
Figure 7. Monthly rainfall-runoff simulation time series in the calibration phase of the GR2M model (Jangaldehy Watershed)

متغیرهای ورودی و در نتیجه تأثیرگذاری بر دقت خروجی مدل شود. در این مطالعه، به‌منظور کاهش اثرات ناشی از عدم قطعیت ورودی‌ها، پیش‌پردازش داده‌ها شامل کنترل کیفیت و بررسی تکمیلی داده‌های مشکوک پیش از ورود به مدل انجام شد. همچنین، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی در بازه‌های زمانی خشک و تر صورت گرفت تا پایداری پارامترها تحت شرایط هیدرولوژیکی متفاوت ارزیابی شود. به‌کارگیری مدلی با تعداد پارامترهای محدود نیز در بهبود شناسایی‌پذیری و کاهش خطاهای ناشی از بیش‌برازش مؤثر بود.

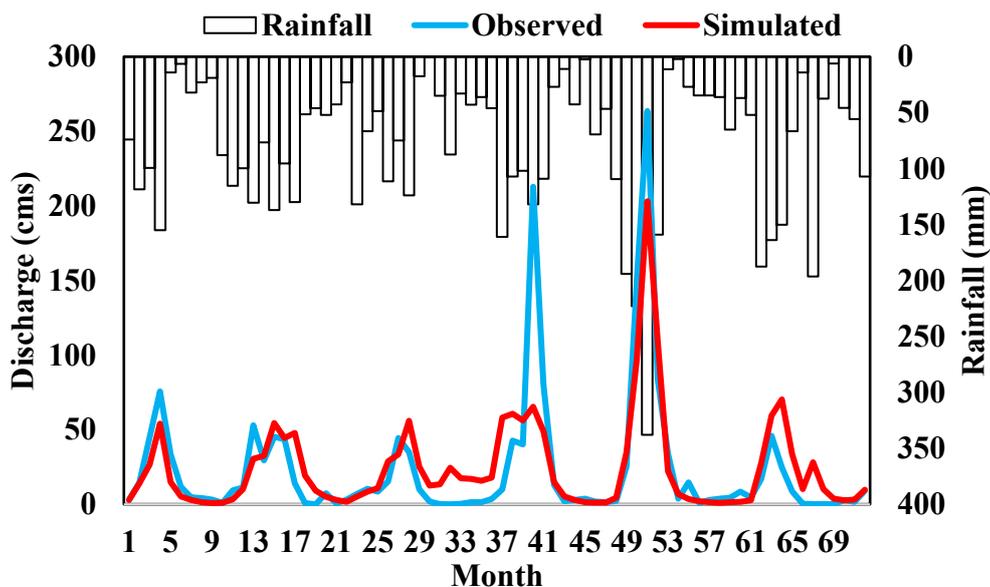
با توجه به جدول ۲ مقادیر ضریب تبیین، میانگین ریشه مربعات خطا، معیار کارایی کلینگ-گوپتا و نش-ساتکلیف برای دوره صحت‌سنجی در حوزه آبریز لزوه برابر با ۰/۵۵، ۱۴/۹۵، ۰/۶۸ و ۰/۳۶ و در حوزه آبخیز جنگلده برابر با ۰/۸۹، ۲۴/۵۲، ۰/۶۸ و ۰/۸۹ است. بنابراین مشخص است که مدل در مرحله صحت‌سنجی نیز دقت رضایت بخشی دارد. این مقادیر در تطابق با نمودارهای سری زمانی جریان رودخانه مشاهده و شبیه‌سازی شده است. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعه Ayele et al. (2017) و Kim et al., 2011 که کارایی بالای مدل را در دوره شبیه‌سازی و دوره مشاهداتی گزارش کردند، مطابقت دارد.

در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای سری زمانی مربوط به مدل‌سازی در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگلده در مرحله صحت‌سنجی ارائه شده است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که مدل GR2M توانسته است به‌طور نسبتاً مناسبی جریان ماهانه را در دوره صحت‌سنجی برآورد کند. با این حال، در هر دو حوزه آبخیز جنگلده و لزوره در برخی ماه‌ها اختلافاتی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود دارد که به‌صورت بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی در مقاطع خاصی از سری زمانی دیده می‌شود. بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی به ازای برخی مشاهدات یک رفتار متداول در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است و باید به تعادل این برآوردها به شکل کلی توجه نمود. رفتار مشابه در مطالعات Kourtis et al. (2025) گزارش شده است.

این رفتار می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در فرآیند مدل‌سازی، دقت داده‌های ورودی و توزیع مکانی و زمانی بارندگی در سطح حوزه آبریز باشد. یکی از عوامل مؤثر در ایجاد این خطاها، موقعیت مکانی ایستگاه‌های ثبت داده‌های بارش و دما است. در این مطالعه، داده‌های مورد استفاده برای بارش و دما در نقاطی ثبت شده‌اند که ممکن است نماینده دقیقی از شرایط کلی حوزه آبریز نباشند. این مسأله می‌تواند منجر به خطا در تخمین



شکل ۸- سری زمانی شبیه‌سازی ماهانه بارش-رواناب در مرحله صحت‌سنجی مدل GR2M (حوزه آبخیز لزوره)
Figure 8. Monthly rainfall-runoff simulation time series in the validation phase of the GR2M model (Lazoreh watershed)



شکل ۹- سری زمانی شبیه‌سازی ماهانه بارش-رواناب در مرحله صحت‌سنجی مدل GR2M (حوزه آبخیز جنگلده)
Figure 9. Monthly rainfall-runoff simulation time series in the validation phase of the GR2M model (Jangalده Watershed)

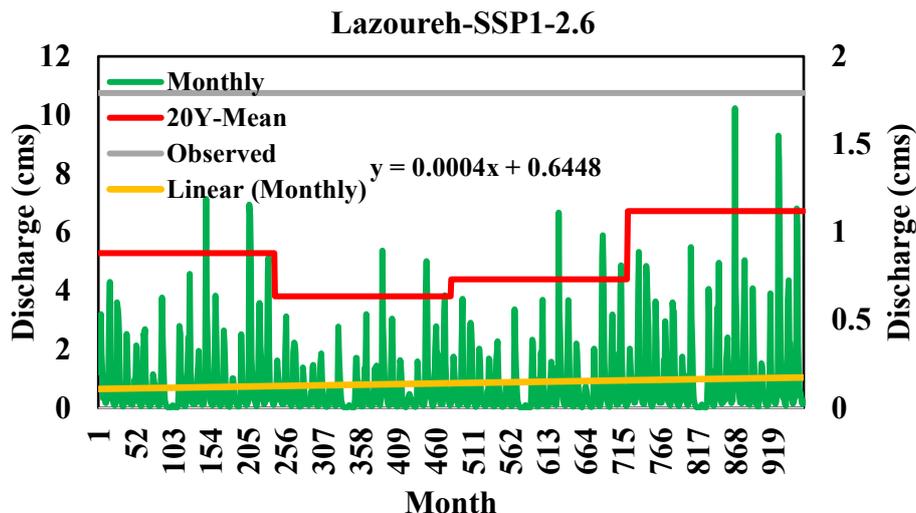
جدول ۲- معیارهای ارزیابی مدل GR2M در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگلده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Jangalده watershed				Lazoreh watershed				Evaluation criteria
NSE	KGE	RMSE	R	NSE	KGE	RMSE	R	
0.69	0.93	7.77	0.71	0.78	0.85	7.76	0.80	Calibration
0.89	0.68	24.52	0.89	0.36	0.68	14.95	0.55	validation

قابل‌صرف‌نظر افزایشی است. همچنین بر اساس این شکل مشخص است که در بازه (۲۰۲۰-۲۰۶۰) با کاهش قابل‌توجه جریان مواجه خواهیم شد اما در بازه (۲۰۸۰-۲۱۰۰) جریان رودخانه به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.

۳-۴- برآورد رواناب تحت سناریو SSP1-2.6

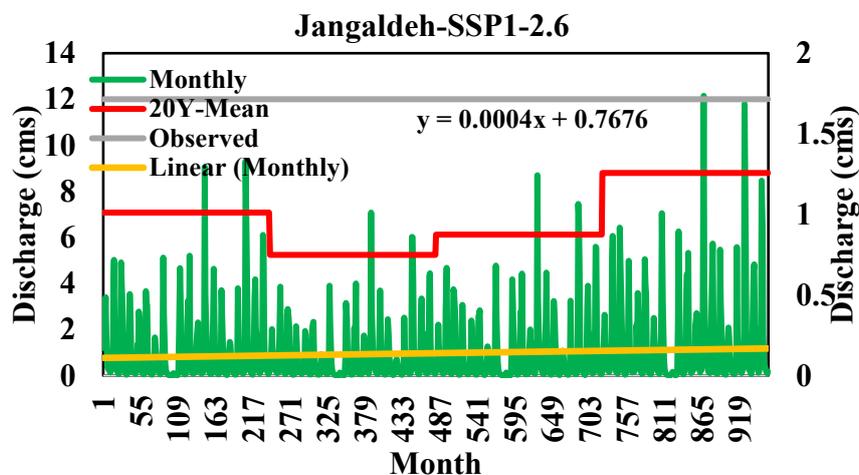
در شکل ۱۰ مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز لزوره تحت سناریو SSP1-2.6 برای دوره آتی نمایش داده شده است. این شکل بیانگر آن است که روند جریان با شیب بسیار محدود و



شکل ۱۰- تغییرات جریان رودخانه در سناریو SSP1-2.6 (حوزه آبخیز لزوره)
Figure 10. Changes in river flow in the SSP1-2.6 scenario (Lazoureh Watershed)

مشخص است که در بازه (۲۰۲۰-۲۰۶۰) با کاهش قابل توجه جریان مواجه خواهیم شد اما در بازه (۲۰۸۰-۲۱۰۰) جریان رودخانه به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. این الگو تاحد زیادی مشابه با نتایج حوزه آبخیز لزوره است.

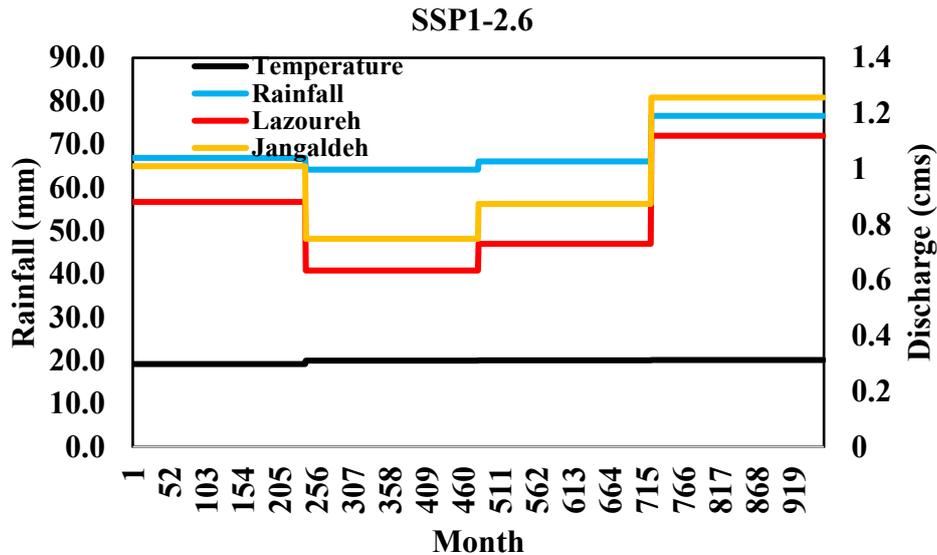
در شکل ۱۱ مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز جنگلده تحت سناریو SSP1-2.6 برای دوره آتی نمایش داده شده است. این شکل بیانگر آن است که روند جریان با شیب بسیار محدود و قابل صرف نظر افزایشی است. بر اساس این شکل



شکل ۱۱- تغییرات جریان رودخانه در سناریو SSP1-2.6 (حوزه آبخیز جنگلده)
Figure 11. Changes in river flow in the SSP1-2.6 scenario (Jangaldehy Watershed)

پیشیده دارد. اگرچه بعد از سال ۲۰۴۰ با افزایش قابل توجه دما، جریان رودخانه کاهش می‌یابد اما در ادامه تغییرات افزایش دما محدود می‌شود و تغییرات جریان رودخانه تطبیق مناسبی با الگوی بارش دارد.

تغییرات دما، بارش و دبی جریان رودخانه برای دو حوزه آبخیز لزوره و جنگلده تحت سناریو SSP1-2.6 در شکل ۱۲ ارائه شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که الگوی تغییرات جریان هر دو حوزه آبخیز مورد بررسی مشابه است. همچنین اگرچه الگوی دما به شکل افزایشی اکید است اما بارش یک الگوی نسبتاً



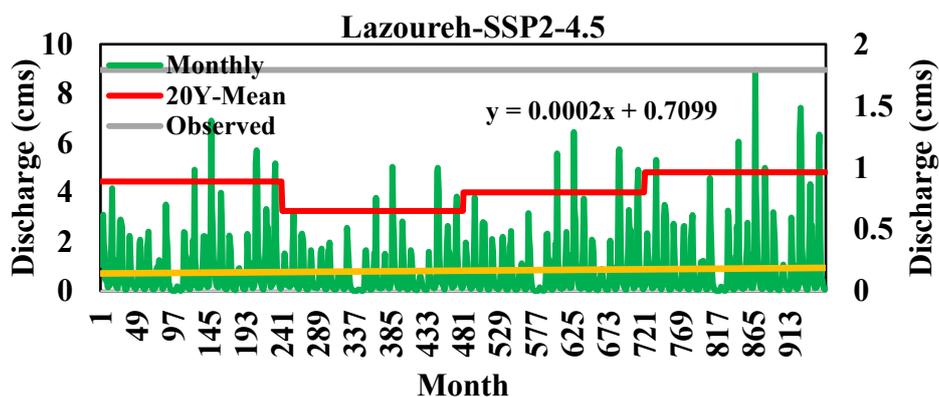
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر بارش، دما و دبی جریان شبیه‌سازی با مدل GR2M در حوضه‌های لزوره و جنگلده تحت سناریو اقلیمی SSP1-2.6

Figure 12. Comparison of precipitation, temperature, and streamflow values simulated with the GR2M model in the Lazoreh and Jangaldehy basins under the SSP1-2.6 climate scenario

در سناریو SSP2-4.5 به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بر اساس این شکل مشخص است که در بازه (۲۰۲۰-۲۰۶۰) با کاهش قابل توجه جریان مواجه است اما در بازه (۲۰۸۰-۲۱۰۰) جریان افزایش می‌یابد. البته بزرگی این افزایش در مقایسه با سناریو SSP1-2.6 به مراتب کوچک‌تر است.

۳-۵- برآورد رواناب تحت سناریو SSP2-4.5

مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز لزوره تحت سناریو SSP2-4.5، در شکل ۱۳ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که روند تغییرات جریان دارای شیب افزایشی بسیار محدود و ناچیز است، به گونه‌ای که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. علاوه بر این، مقایسه با سناریوی SSP1-2.6 حاکی از آن است که شیب روند

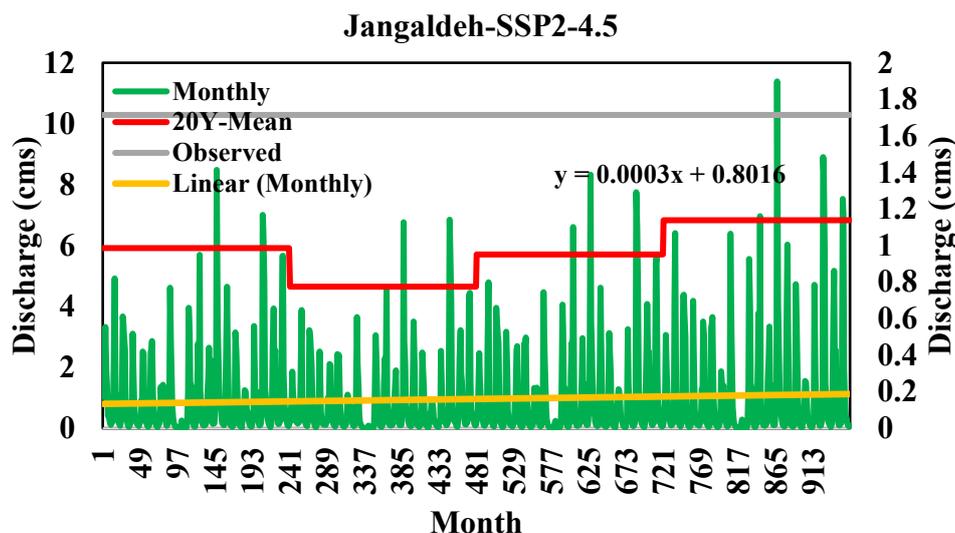


شکل ۱۳- تغییرات بلند مدت جریان رودخانه در سناریو SSP2-4.5 (حوزه آبخیز لزوره)

Figure 13. Changes in river flow in the SSP2-4.5 scenario (Lazoreh Watershed)

می‌دهد. به‌علاوه آشکار می‌شود که در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۶۰، جریان رودخانه با کاهش قابل توجهی مواجه خواهد شد، در حالی که در بازه ۲۰۸۰ تا ۲۱۰۰ روند افزایشی در جریان مشاهده می‌شود. با این حال، میزان این افزایش در مقایسه با سناریو SSP1-2.6 به مراتب کم‌تر است. این الگوی تغییرات تا حد زیادی مشابه آن‌چه در حوزه آبخیز لزوره مشاهده شده، است.

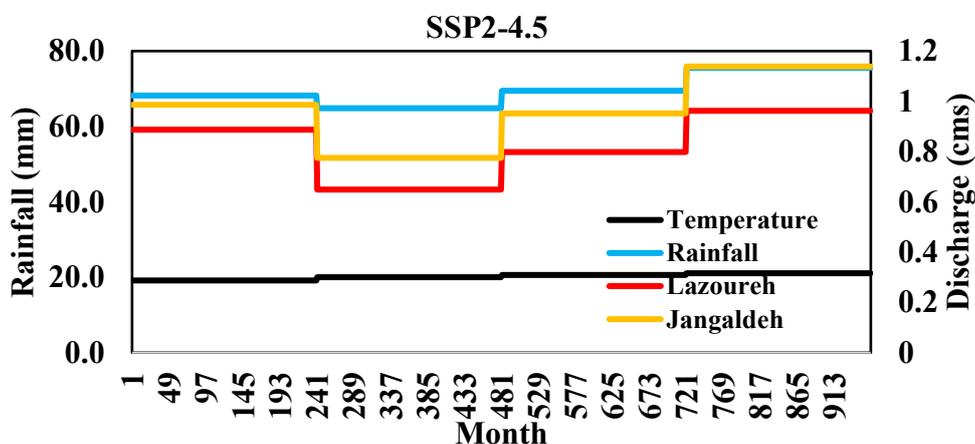
در شکل ۱۴ مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز جنگلده تحت سناریو SSP2-4.5 برای دوره آبی ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که روند تغییرات جریان رودخانه دارای شیب افزایشی بسیار محدود و ناچیز است، به گونه‌ای که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. همچنین، شیب روند برآورد شده در مقایسه با سناریو SSP1-2.6 کم‌تر بوده و افزایش کمتری را نشان



شکل ۱۴- تغییرات بلند مدت جریان رودخانه در سناریو SSP2-4.5 (حوزه آبخیز جنگلده)
Figure 14. Changes in river flow in the SSP2-4.5 scenario (Jangaldehy Watershed)

بارش رفتاری پیچیده‌تر از خود نشان می‌دهد. پس از سال ۲۰۴۰، با افزایش قابل توجه دما، جریان رودخانه کاهش می‌یابد، اما در ادامه، روند افزایش دما محدودتر شده و تغییرات جریان هر دو رودخانه هماهنگی بیشتری با نوسانات بارش پیدا می‌کند.

تغییرات دما، بارش و دبی جریان رودخانه در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگلده تحت سناریو SSP2-4.5 در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که الگوی تغییرات جریان رودخانه در هر دو حوزه آبخیز شباهت قابل توجهی دارد. در حالی که روند تغییرات دما به‌طور یکنواخت افزایشی است، الگوی



شکل ۱۵- مقایسه مقادیر بارش، دما و دبی جریان شبیه‌سازی با مدل GR2M در حوضه‌های لزوره و جنگلده تحت سناریو اقلیمی SSP2-4.5

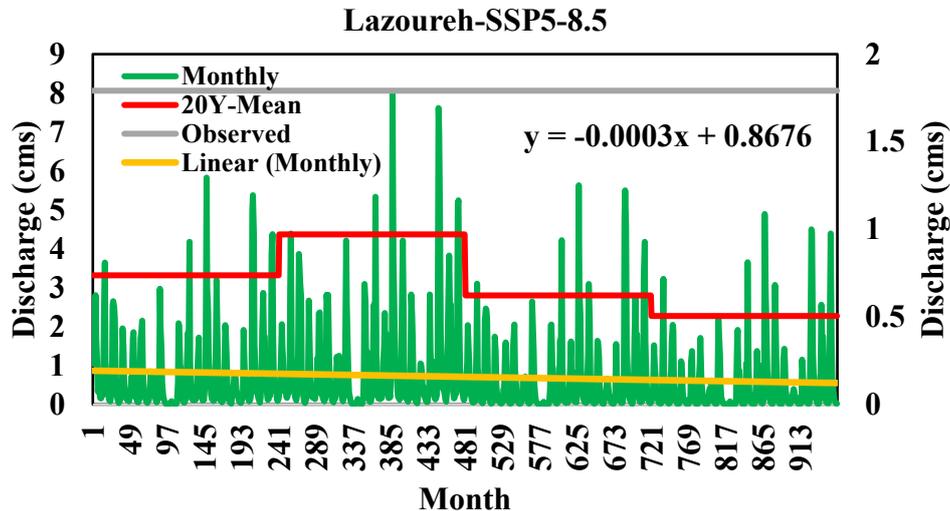
Figure 15. Comparison of precipitation, temperature, and streamflow values simulated with the GR2M model in the Lazoureh and Jangaldehy basins under the SSP2-4.5 climate scenario

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که یافته‌های حاصل از سناریوی بدینانه SSP5-8.5 تفاوت قابل توجهی با دو سناریوی دیگر دارد و کاهش جریان در این سناریو محتمل‌تر به نظر می‌رسد. به‌علاوه مشخص می‌شود که در بازه زمانی ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰، جریان رودخانه افزایش می‌یابد، اما در ادامه و طی دوره ۲۰۶۰ تا ۲۱۰۰، روندی کاهش را تجربه می‌کند. مقایسه این نتایج با سناریوهای

۳-۶- برآورد رواناب تحت سناریو SSP5-8.5
مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز لزوره تحت سناریو SSP5-8.5 در شکل ۱۶ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که روند جریان رودخانه دارای شیب کاهشی محدودی است. لازم به ذکر است که در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، روند تغییرات جریان به‌صورت محدود افزایشی بوده است.

سالانه در اکثر سناریوها به‌ویژه در سناریوی بدبینانه RCP5-8.5 دارای روندی کاهشی است. این کاهش بارش در سناریوی RCP5-8.5 منجر به کاهش قابل‌توجهی در حجم رواناب به میزان ۷/۱۶ درصد در دوره نزدیک (۲۰۲-۲۰۳۸) و تا ۱/۲۹ درصد در دوره دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) شده است.

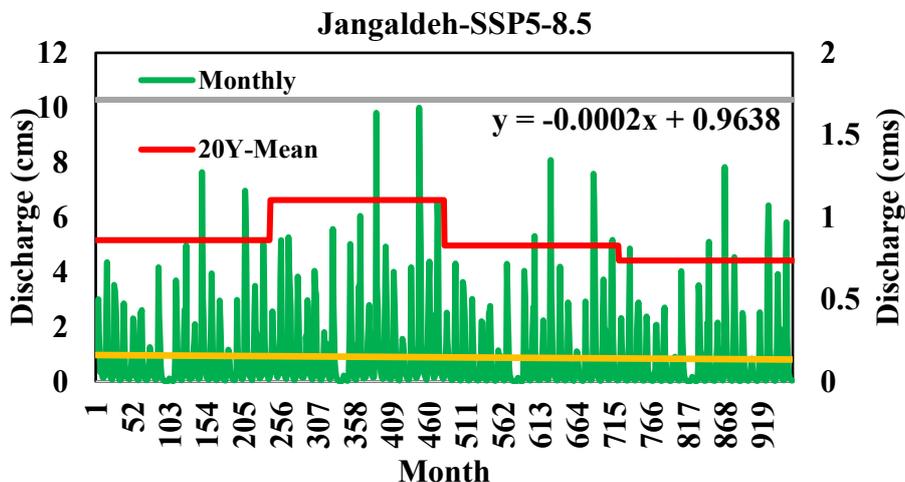
SSP1-2.6 و SSP2-4.5 نشان می‌دهد که یافته‌های سناریو SSP5-8.5 تفاوت قابل‌توجهی با دو سناریوی دیگر دارد، که بیانگر تأثیرات چشم‌گیرتر این سناریوی بدبینانه بر جریان رودخانه در بلندمدت است. در مطالعه‌ای که توسط Memarian (2025) در حوزه آبخیز شهری کاشمر برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب انجام شده است مشاهده می‌شود که بارش



شکل ۱۶- تغییرات بلند مدت جریان رودخانه در سناریو SSP5-8.5 (حوزه آبخیز لزوره)
Figure 16. Changes in river flow in the SSP5-8.5 scenario (Lazoureh Watershed)

مشاهده می‌شود که مقادیر برآورد شده دبی جریان در حوزه آبخیز جنگله تحت سناریو SSP5-8.5 به‌همراه میانگین بلندمدت دوره مشاهداتی و میانگین دوره‌های ۲۰ ساله آتی ارائه شده است. بر اساس این شکل مشخص است که در بازه (۲۰۲۰-۲۰۶۰) جریان افزایش یافته، اما در بازه (۲۱۰۰-۲۰۶۰) جریان رودخانه کاهش می‌یابد. یافته‌های سناریوی SSP5-8.5 در مقایسه با سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 تفاوت قابل‌توجه دارند. این الگو تا حد زیادی مشابه با حوزه آبخیز لزوره است.

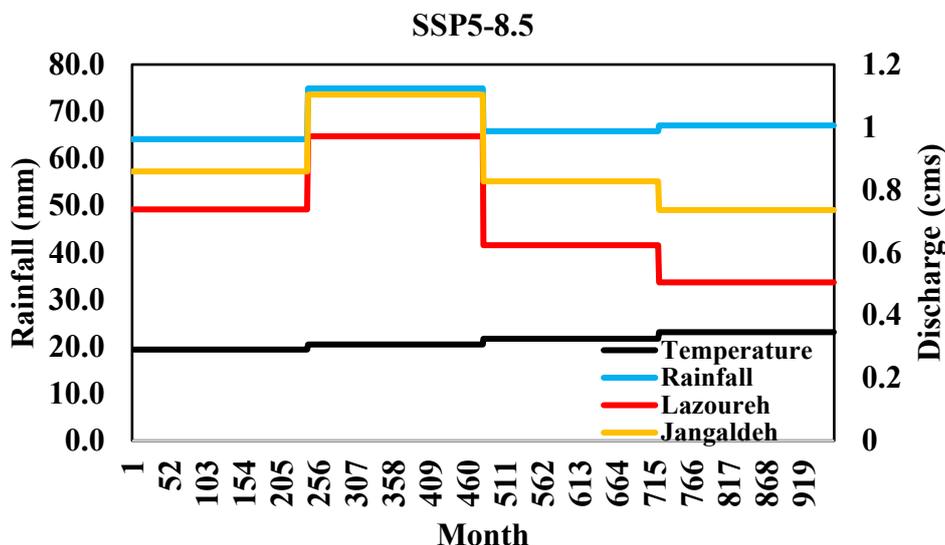
مقادیر محاسباتی دبی جریان در حوزه آبخیز جنگله تحت سناریو SSP5-8.5 برای دوره آینده در شکل ۱۷ ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که روند جریان دارای شیب کاهشی محدودی است. در حالی که در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 روند جریان با شیب محدود افزایشی بوده است، نتایج سناریو SSP5-8.5 تفاوت قابل‌توجهی با دو سناریوی دیگر دارد. این اختلاف نشان‌دهنده تأثیرات شدیدتر تغییرات اقلیمی در سناریوی بدبینانه بر کاهش جریان در حوزه آبخیز جنگله است. در ادامه



شکل ۱۷- تغییرات بلند مدت جریان رودخانه در سناریو SSP5-8.5 (حوزه آبخیز جنگله)
Figure 17. Changes in river flow in the SSP5-8.5 scenario (Jangaldehy Watershed)

و SSP2-4.5 افزایش دما در دوره‌های مختلف نسبتاً مشابه است. در بازه (۲۰۴۰-۲۰۶۰) افزایش بارش بر افزایش دما تا حدی موثر است و موجب افزایش دبی جریان می‌شود، اما در ادامه در بازه (۲۰۶۰-۲۱۰۰) با کاهش بارش و افزایش دما مقدار جریان به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تغییرات پارامترهای دما، بارش و دبی جریان برای دو حوزه آبخیز لزوره و جنگله تحت سناریو SSP5-8.5 در شکل ۱۸ به نمایش درآمده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که الگوی تغییرات جریان در دو حوزه آبخیز مورد بررسی مشابه است. همچنین اگرچه الگوی دما به شکل افزایشی اکید است، اما بارش یک الگوی نسبتاً پیچیده دارد. بر خلاف سناریوهای SSP1-2.6



شکل ۱۸- مقایسه مقادیر بارش، دما و دبی جریان شبیه‌سازی با مدل GR2M در حوضه‌های لزوره و جنگله تحت سناریو اقلیمی SSP5-8.5

Figure 18. Comparison of precipitation, temperature, and streamflow values simulated with the GR2M model in the Lazoreh and Jangaldehy basins under the SSP5-8.5 climate scenario

رودخانه در دوره‌های آتی خواهد شد. بنابراین، مهم‌ترین نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تحت هر سه سناریو مورد بررسی در پژوهش حاضر مقدار جریان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی به مراتب نسبت به دوره مشاهداتی کاهش خواهد یافت که این موضوع لزوم توجه بیشتر به برنامه‌ریزی منابع آب در پایاب این حوضه‌ها را برجسته می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به تنوع مدل‌های هیدرولوژیکی بارش-رواناب در دسترس، به دلیل افزایش بهره‌وری انتخاب یک مدل مناسب با شرایط و هدف هر مطالعه دشوار است. بنابراین نیاز است تا کارایی مدل‌ها برای تشخیص قابلیت و محدودیت آن‌ها در حوضه و در هر منطقه تعیین شود. در این پژوهش از مدل بارش-رواناب GR2M استفاده شده است. همچنین برای پیش‌بینی بارش-رواناب در آینده در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگله از مدل ACCESS-ESM1-5 و تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۳-۲۱۰۰) استفاده شد و توسط LARS-WG8 ریزمقیاس شدند. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی در هر دو حوزه آبخیز در

بررسی تغییرات رواناب در دو حوزه آبخیز لزوره و جنگله تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داد که الگوی کلی تغییرات در هر دو حوزه مشابه است. در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، روند کلی جریان افزایشی بسیار محدود داشته و در هر دو سناریو کاهش قابل توجه رواناب در دوره (۲۰۲۰-۲۰۶۰) و افزایش آن در دوره (۲۰۸۰-۲۱۰۰) مشاهده شد. با این تفاوت که شدت افزایش در SSP2-4.5 کمتر از SSP1-2.6 بود. در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، روند کلی جریان اندکی کاهشی بود و پس از یک افزایش کوتاه‌مدت در (۲۰۴۰-۲۰۶۰)، کاهش محسوس رواناب تا پایان قرن پیش‌بینی شد. تحلیل هم‌زمان دما و بارش نشان داد که تغییرات جریان بیش‌تر تحت تاثیر بارش است، هرچند افزایش یکنواخت دما، به‌ویژه در SSP5-8.5، نقش تشدیدکننده در کاهش رواناب دارد. این نتایج بیانگر حساسیت بیش‌تر جریان به سناریوهای با انتشارات بالاتر است. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج مطالعاتی همچون Mahdaoui et al. (2024) و Kourtis et al. (2025) مطابقت دارد و مشاهده می‌شود که تغییر اقلیم با افزایش دما و کاهش بارندگی باعث کاهش جریان دبی

خلیل قربانی: نظارت، مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ موسی حسام: مفهوم‌سازی، کنترل نتایج؛ لاله رضائی‌قلعه: مفهوم‌سازی، بازبینی متن مقاله؛ فریبا نیرومندفرد: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ میثم سالاری‌جزی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، کنترل نتایج

منابع

- حاجی محمدی، مرضیه، عزیزیان، ابوالفضل و قرمزچشمه، باقر. (۱۳۹۷). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کن. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰(۲)، ۱۴۴-۱۵۶. doi: 10.22092/ijwmse.2018.116456
- حجاریور، امیر، یوسفی، مرضیه و کامکار، بهنام. (۱۳۹۳). آزمون دقت شبیه‌سازهای LARS-WG، WeatherMan و CLIMGEN در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی سه اقلیم مختلف (گرگان، گنبد و مشهد). جغرافیا و توسعه، ۱۲(۳۵)، ۲۰۱-۲۱۶. doi: 10.22111/gdij.2014.1563
- رسولی، علی اکبر، مجید رضائی بنفشه، مجید، مساح یوانی، علیرضا، خورشید دوست، علی محمد، و قرمزچشمه، باقر. (۱۳۹۳). بررسی اثر عوامل مرفو-اقلیمی بر دقت ریز مقیاس‌گردانی مدل LARS-WG. علوم و مهندسی آبخیزداری/ایران، ۸ (۲۴). doi: 20.1001.1.20089554.1393.8.24.2.9
- زندى دره‌غریبی، فاطمه، خورشیدی کوهانستانی، زهره، مزین، ملیحه و آرمان، نسیم. (۱۳۹۶). گزارش فنی: بررسی کارایی مدل‌های بارش-رواناب GR4J و GR2M در شبیه‌سازی جریان حوزه آبخیز دره‌تخت. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۹(۳)، ۳۶۰-۳۷۰. doi: 10.22092/ijwmse.2017.112377
- زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی، و صالح آبادی، نرگس. (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6). ژئوفیزیک/ایران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴. doi: 10.30499/ijg.2020.249997.1292
- عسگری، ابراهیم، مصطفی‌زاده، رؤف، و حاجی، خدیجه. (۱۳۹۸). تحلیل نقاط تغییر در سری زمانی دبی برخی ایستگاه‌های هیدرومتری استان گلستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۵). doi: 10.22034/jest.2018.21474.3049.۸۱-۹۳
- گودرزی، مسعود، و برومند صلاحی، سید اسعد حسینی، (۱۳۹۴). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه)، اکو هیدرولوژی، ۲(۲)، ۱۷۵. doi: 10.22059/ije.2015.56152
- مصطفی‌زاده، رؤف و عسگری، ابراهیم. (۱۴۰۰). ارزیابی کارایی مدل بارش-رواناب GR4J در شبیه‌سازی دبی روزانه جریان در حوزه آبخیز نیچای اردبیل. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۱(۳)، ۷۹-۹۵. doi: 10.22125/iwe.2021.128114
- نادری، مهین، ایلدرمی، علیرضا، نوری، حمید، آقا امین، سهیلا، و زینی‌وند، حسین. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی و اقلیم

دوره مشاهداتی توسط مدل GR2M نشان از کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه براساس میزان کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) و نیز میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) دارد. در ادامه ارزیابی اثر سه سناریوی اقلیمی گزارش ششم (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) بر الگوی بارش-رواناب در دو حوزه آبخیز زوروه و جنگله نشان داد که تغییرات اقلیم آینده، علاوه بر تغییر در حجم جریان، ماهیت رابطه بارش و رواناب را نیز دستخوش تحول می‌سازد. در سناریوهای خوش‌بینانه و میانه، کاهش جریان عمدتاً به افزایش دما و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق مربوط است، هرچند در برخی بازه‌ها کاهش بارش نیز این اثر را تشدید می‌کند. در مقابل، در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 کاهش جریان ناشی از اثر هم‌زمان افزایش دما و کاهش بارش شدیدتر بوده و به‌ویژه در بازه (۲۰۸۰-۲۱۰۰) افت چشم‌گیری ایجاد می‌کند. این یافته‌ها بیانگر حساسیت بیش‌تر رواناب به تغییرات بارش در سناریوهای با انتشار بالاتر است، به‌طوری که حتی با ثبات نسبی بارش، افزایش دما می‌تواند موجب افت معنادار رواناب شود. بر این اساس، انتظار می‌رود تحقق سناریوهای با انتشارات بالاتر موجب کاهش پایدار منابع آب سطحی شود که ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری، مدیریت تقاضا، بهینه‌سازی بهره‌برداری از رواناب، و توسعه زیرساخت‌های مرتبط را در منطقه مطالعاتی و حوضه‌های مشابه برجسته می‌سازد. هم‌چنین، عملکرد رضایت‌بخش مدل GR2M در بازتولید رابطه بارش-رواناب در شرایط مختلف اقلیمی، استفاده از آن را به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی در سایر حوضه‌های کشور توصیه می‌کند.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از طرح آب منطقه‌ای استان گلستان با عنوان (آینده پژوهی طرح‌های توسعه منابع آب استان گلستان با لحاظ تغییر اقلیم و بر اساس تجارب عملکرد طرح‌های بهره‌برداری - مطالعه موردی شبکه آبیاری و زهکشی نرمام) است لذا از همکاری و حمایت تمامی همکاران سپاسگزاری می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نیرومندفرد، فریبا، ذاکری‌نیا، مهدی، و یازرلو، بهناز. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب HBV-light: مطالعه موردی حوضه محمدآباد در استان گلستان. *مهندسی آبیاری و آب/ ایران*، ۷(۴)، ۱۵۲-۱۶۳.
 همت‌جو، کوثر، معماریان، هادی، چزگی، و مومنی، دمنه. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل تولید رواناب در حوضه آبخیز شهری کاشمر. *سامانه‌های سطوح آبخیز باران*، ۱۳(۲)، ۸۳-۱۰۰.
 doi: 20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7

بر رواناب حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرین). *هیدروژئومورفولوژی*، ۵(۱۴)، ۲۳-۴۲.
 doi:20.1001.1.23833254.1397.5.14.2.6.۴۲
 نیرومندفرد، فریبا، ذاکری‌نیا، مهدی و یازرلو، بهناز. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوضه محمدآباد در استان گلستان). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۱(۳)، ۱۰۳-۱۱۷.
 doi: 10.22055/jise.2018.13750

References

- Asgari, E., Mostafazadeh, R., & Haji, K. (2019). Change point analysis of discharge time series in some hydrometric stations in Golestan Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5)- 81-93. [In Persian]. doi:10.22034/jest.2018.21474.3049
- Ayele, G. T., Teshale, E. Z., Yu, B., Rutherford, I. D., & Jeong, J. (2017). Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*, 9(10), 782. doi:10.3390/w9100782
- Chen, Y., Ren, Q., Huang, F., Xu, H., & Cluckie, I. (2011). Liuxihe model and its modeling to river basin flood. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(1), 33-50. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000286
- Choudhary, S., Pingale, S. M., Khare, D., & Krishan, R. (2025). Quantification of the surface and groundwater dynamics of Upper Godavari Sub-Basin using SWAT-MODFLOW and CMIP6 climate change scenarios. *Hydrological Sciences Journal*, (just-accepted). Doi:10.1080/02626667.2025.2492891
- Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Weekaew, J., Tran, T. T., & Pham, Q. B. (2023). Comparative study of machine learning methods and GR2M model for monthly runoff prediction. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4), 101941. doi: 10.1016/j.asej.2022.101941
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007. doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126
- Fathi, M. M., Awadallah, A. G., Abdelbaki, A. M., & Haggag, M. (2019). A new Budyko framework extension using time series SARIMAX model. *Journal of hydrology*, 570, 827-838. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.037
- Goodarzi, M., Salahi, B., & Hosseini, S.A. (2015). Investigating the effect of climate change on changes in surface runoff (case study: Lake Urmia catchment). *Journal of Ecohydrology*, 2(2), 175-189. [In Persian]. doi:10.22059/ije.2015.56152
- Hardy, J. T. (2003). Climate change: causes, effects, and solutions. *John Wiley & Sons*.
- Hajimohammadi, M., Azizian, A., & Ghermezcheshmeh, B. (2018). Evaluation of the impact of climate change on runoff in Kan Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(2), 144-156. [In Persian]. doi:10.22092/ijwmse.2018.116456
- Hajarpoor, A., Yousefi, M., & Kamkar, B. (2014). Accuracy assessment of weather assimilators of CLIMGEN, LARS-WG and weather man in assimilation of three different climatic parameters of three different climate (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geography and Development*, 12(35), 201-216. [In Persian]. doi:10.22111/gdij.2014.1563
- Jaiswal, R. K., Ali, S., & Bharti, B. (2020). Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied water science*, 10(1), 48. doi:10.1007/s13201-019-1122-6
- Jafari, F., Moradi, H., & Bagheri, A. (2024). River Discharge Changes in Eastern Watersheds of Mazandaran Province under the Impact of Climate Change. *Journal of Watershed Management Research*, 15(1), 14-28. doi:10.61186/jwmr.15.1.14
- Jiang, F., Li, C. W., & Qian, Y. (2019). Can firms run away from climate-change risk? Evidence from the pricing of bank loans. *Unpublished manuscript*.
- Kabouya, M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale (*Doctoral dissertation, Université Paris Sud Orsay*).
- Kim, S. S. H., Dutta, D., Singh, R., Chen, J., & Welsh, W. D. (2011, December). Providing flexibility in GUI-based river modelling software: Using Expression Editors and plug-ins to create Custom Functions in Source IMS. *In 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia* (pp. 12-16).
- Kourtis, I.M., Papadopoulou, C.A., Trabucco, A., Peano, D., Sangelantoni, L., Mellios, N., Laspidou, C., Papadopoulou, M.P., & Tsihrintzis, V. A. (2025). Methodological framework for the evaluation of climate change impacts on rural basins using the GR2M model. *Environmental Processes*, 12(1), 1-26. doi:10.1007/s40710-025-00755-5

- Lee, H., McIntyre, N., Wheeler, H., & Young, A. (2005). Selection of conceptual models for regionalisation of the rainfall-runoff relationship. *Journal of Hydrology*, 312(1-4), 125-147. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.016
- Lerat J, Chiew F, Robertson D et al (2024) Data assimilation informed model structure improvement (DAISI) for robust prediction under climate change: application to 201 catchments in southeastern Australia. *Water Resour Res* 60. doi.org/10.1029/2023WR036595
- Liu, Y., Zhang, K., Li, Z., Liu, Z., Wang, J., & Huang, P. (2020). A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, 590, 125440. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125440
- Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162(3-4), 299-318. doi:10.1016/0022-1694(94)90233-X
- Mahdavian, S., Zeynali, B., & Salahi, B. (2024). Evaluation of the hydrological response of the Kiwi Chai catchment area to future climate changes with the SWAT model. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(3), 8815-8800. doi:10.22034/jess.2022.368578.1900
- Mahdaoui, K., Chafiq, T., Asmlal, L., & Tahiri, M. (2024). Assessing hydrological response to future climate change in the Bouregreg watershed, Morocco. *Scientific African*, 23, e02046. doi: 10.1016/j.sciaf. 2023.e02046
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, J., Themel, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). doi:10.1029/2009RG000314.
- Marshall, S. R., Tran, T. N. D., Arshad, A., Rahman, M. M., & Lakshmi, V. (2025). SWAT and CMIP6-driven hydro-climate modeling of future flood risks and vegetation dynamics in the White Oak Bayou Watershed, *United States. Earth Systems and Environment*, 1-23. Doi:10.1007/s41748-025-00621-2
- Memarian H. Evaluation of Climate Change Impact on Runoff Potential in Kashmar Urban Watershed. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 2025; 13 (2): 5. [In Persian]. dor:20.1001.1.24235970.1404.13.2.5.7
- Motamedvaziri, B., Ahmadi, M., Ahmadi, H., Moeini, A., & Zehtabian, G.R. (2020). Evaluation of the impact of climate change on extreme flows in Kan watershed. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 9(2), 101-121.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of hydrology*, 318(1-4), 200-214. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.014
- Mouelhi, S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier (Doctoral dissertation, ENGREF Paris).
- Mostafazadeh, R., & Asgari, E. (2021). Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province. *Irrigation and Water Engineering*, 11(3), 79-95. [In Persian]. doi:10.22125/iwe.2021.128114
- Munawar, S., Tahir, M. N., & Baig, M. H. A. (2021). Future climate change impacts on runoff of scarcely gauged Jhelum River basin using SDSM and RCPs. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 2993-3004. doi:10.2166/wcc.2021.283
- Naderi, M., Ilderami, A., Nouri, H., Aghabeigi Amin, S., & Zainivand, H. (2018). Investigating the impact of land use change and climate on watershed runoff using the SWAT model (case study: Green Basin). *Journal of Hydrogeomorphology*, 16(3), 61-79. [In Persian]. doi:20.1001.1.23833254.1397.5.16.4.2
- Ndiaye, C. and Ndao, S. (2024) Hydrological Modelling of the Casamance River in Its Upstream Section (Basin at Kolda Level) to Predict Its Future States as a Function of Different Stresses. *Open Journal of Geology*, 14, 143-154. doi: 10.4236/ojg.2024.142009.
- Niroumandfard, F., Zakerinia, M. and Yazerloo, B. (2018a). Investigating the Effect of Climate Change on River Flow Using IHACRES Rainfall-Runoff Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), 103-117. [In Persian]. dor:20.1001.1.25885952.1397.41.3.8.8
- Niroumandfar, F., Zaherinia, M., & Yazarloo, B. (2018b). Investigating the effect of climate change on river flow using HBV-light rainfall-runoff model; Case study MohammadAbad watershed, Golestan. *Irrigation and Water Engineering*, 7(4), 152-163. [In Persian].
- Niazkar, M., Goodarzi, M. R., Fatehifar, A., & Abedi, M. J. (2023). Machine learning-based downscaling: Application of multi-gene genetic programming for downscaling daily temperature at Dogonbadan, Iran, under CMIP6 scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1), 153-168. doi:10.1007/s00704-022-04274-3
- Nounangnonhou, T. C., Fifatin, F. X. N., Lokonon, B. E., Acakpovi, A., & Sanya, E. A. (2018).

- Modelling and prediction of Ouémé (Bénin) river flows by 2040 based on GR2M approach. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (33), 71-91.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of hydrology*, 242(3-4), 275-301. doi:10.1016/S0022-1694(00)00393-0
- Rasuli, A., Rezaei-Banafsheh, M., & Ghermezcheshmeh, B. (2014). Investigation impact of morpho-climatic parameters on accuracy of LARS-WG model. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(24), 0-0. [In Persian].
- Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., & Yaseen, Z. M. (2024). Prediction enhancement for surface water sodium adsorption ratio using limited inputs: Implementation of hybridized stacked ensemble model with feature selection algorithm. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 134, 103561. doi:10.1016/j.pce.2024.103561
- Usta, D. F. B., Teymouri, M., & Chatterjee, U. (2022). Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 416. doi:10.1007/s12517-022-09709-9
- Wang, W. C., Chau, K. W., Xu, D. M., & Chen, X. Y. (2015). Improving forecasting accuracy of annual runoff time series using ARIMA based on EEMD decomposition. *Water resources management*, 29, 2655-2675. doi:10.1007/s11269-015-0962-6.
- Zamoum, S., & Souag-Gamane, D. (2019). Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(11), 342. doi:10.1007/s12517-019-4487-9
- Zandi Dareh Gharibi, F., Khorsandi Kouhanestani, Z., Mozayan, M. and Arman, N. (2017). Technical Note: Evaluating the proficiency of GR2M and GR4J rainfall-runoff models in Darehtakht Basin runoff simulation. *Watershed Engineering and Management*, 9(3), 360-370. [In Persian]. doi: 20.1001.1.22519300.1396.9.3.10.0
- Zarrin, A., Dadashi-Rodbari, A., & Salehabadi, N. (2021). Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*, 15 (1), 35-54. [In Persian]. doi:10.30499/ijg.2020.249997.1292
- Zhou, X., Leng, Y., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., & Farooque, A. A. (2024). Development of forecasting of monthly SAR time series in river systems: A multivariate data decomposition-based hybrid approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1355-1375. doi: 10.1016/j.psep.2024.06.050