

Research Paper


Measurement and Prediction of the Potential Occurrence of Floods Under Climate Change Conditions (Case study: Gorgānroud watershed) ❖

Abdolkāfey Panāhi¹, Gholāmrezā Jānbāz Ghoādi^{2*}, Sadraddin Motavalli³, Shahryār Khāledi⁴

1. Ph.D student in climatology, Department of Natural Geography, Noor branch,, Islamic Azad University, Noor, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Natural Geography, Noor branch, Islamic Azad University Noor, Iran.
3. Associate Professor, Department of Natural Geography, Noor branch, Islamic Azad University, Noor, Iran.
4. Professor, Department of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

 DOI: 10.22124/GSCAJ.2023.22411.1172

Received: 2022/06/02

 DOR: 20.1001.1.27831191.1402.4.2.3.1

Accepted: 2023/03/05

Abstract

Flood management is a comprehensive approach that includes multiple evaluation indicators in the river basin and an effective and stable but complex method. Flood risk assessment provides valuable information for flood management in order to assess vulnerability and exposure to risk. The method of the current research, according to the nature of the problem and the subject under investigation, is descriptive-analytical and applied studies with emphasis on quantitative methods. In the current research, the regional changes in flood occurrences in the Gorgānroud watershed were investigated using information from meteorological stations (synoptic data) over a 30-year period (1999 to 2018), land use, plant cover, topographic moisture index, slope, elevation, lithology, distance from the river, river density, erosion, soil analysis, runoff, and simulated data of mean precipitation obtained from the HadCM3 model in LARS-WG under the SRA1B scenario for the years 2011 to 2045. In this study, two different approaches were employed. In the first approach, the LARS-WG model was used for downscaling to predict the future climate conditions (near and distant future), while in the second approach, the SWAT hydrological model was utilized to assess flood risk. Based on the percentage of potential hazards in the Gorgānroud watershed, zoning was conducted using the SWAT and GIS software in order to delineate the areas at risk. In this study, based on the SWAT model, the daily precipitation and daily temperature of synoptic stations were calibrated. The results have shown that climate change and the alteration of natural environmental conditions in the region have led to various consequences and impacts, including changes in precipitation patterns, the emergence of heterogeneity in historical data series, fluctuations in river water levels, reduction in agricultural production, changes in plant composition and productivity in grasslands, alterations in groundwater levels, and the occurrence of social and economic problems. Some behaviors in the time series of climatic elements are sudden, intense, and unstable, appearing unexpectedly. Physiographies factors such as slope, soil texture, land use, and rock permeability have caused different hydrological responses to precipitation events in various watershed areas, which significantly influence the occurrence and characteristics of flash floods.

Keywords: Climate Change, Flood Risk, Modeling, GIS, SWAT, Gorgānroud.

Highlight

- The occurrence of severe floods, the drying up of wetlands and rivers in the north of Golestan province, and the occurrence of micro dust are the direct effects of climate change.
- The occurrence of climate changes will be more pronounced in the future, so the analysis and forecasting of climate changes is of particular importance.

❖ This article is taken from the doctoral dissertation of the first author entitled "Modelling and forecasting the risk of flooding under climate change conditions" (Case study: Gorgānroud watershed), which was supervised by the second author, supervised by the third author, and consulted by the fourth author at Azad University. Islam became the light unit of defense.

* Corresponding Author: gghobadi@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Flood is considered one of the natural phenomena and highly significant and destructive hazards at a global level, accompanied by human and financial losses every year, in various parts of the world, including Iran. Climate change has consequences and effects on the occurrence of the global warming phenomenon, reduction in agricultural productions, alteration in biodiversity and vegetation coverage of grasslands, changes in groundwater levels, and the emergence of social and economic problems. This research aimed to zoning and model flood-prone and risk areas for a changing climate. The research approach is focused on the climate change perspective and its effects on the hydrology of the Gorgānrud watershed. The key objective was to model and predict the risk of flood occurrence in a regional area under climate change conditions using the fuzzy analysis algorithm, hierarchical analysis, and the SWAT model in the watersheds of Golestān Province. Although numerous studies have been conducted on rainfall phenomena in the Golestān province and Iran, none of them have comprehensively examined the climate variability perspective combined with environmental variables.

Methodology

The Gorgān River Basin, with an area of 10,197 square kilometers, is one of the northeastern basins of the country. A significant portion of this basin is located in Golestān Province. The basin is bordered by the Alborz Mountain range to the south, Āladāgh and Gole-Dāgh Mountains to the east, the Atrak River Basin to the north, and the Caspian Sea and the Qareh-Su Basin to the west. This basin is located within the geographical coordinates of 54 degrees and 10 minutes' east longitude and 36 degrees and 35 minutes at 38 degrees and 15 minutes' north latitude. In the present study, the regional flood changes in the Gorgānrud watershed are assessed based on the utilization of data from meteorological stations (synoptic data) of the Meteorological Organization, using a 30-year statistical period (1989 to 2018), land use, plant cover, topographic moisture index, slope, elevation, geological lithology, distance from the river, river density, erosion, soil analysis, runoff, and simulated data of average precipitation derived from the HadCM3 model in LARS-WG under the SRA1B scenario for the years 2011 to 2045. SWAT is an extension under the ArcGIS software that is used for simulating major hydrological processes, including evapotranspiration, surface runoff, deep percolation, groundwater flow, and subsurface flows using the simulator model. The spatial input variables for the SWAT model in this study included data layers such as the Digital Elevation Model (DEM), soil layer with soil texture information, and land use/land cover layer with descriptive information. The hydroclimatology and numerical input variables for the SWAT model included daily precipitation values, minimum and maximum temperature values from stations within and outside the watershed, and average daily runoff values from the watershed outlet along with their geographic locations.

Results and discussion

By analyzing and examining the obtained results, it can be inferred that climate change phenomenon will gradually have noticeable effects on the study area, leading to changes in temperature and precipitation parameters. This will result in a decrease in winter precipitation and an increase in the temperature of the study area. Based on the analysis of the changes, it is expected that with the increase in scenarios, the runoff will decrease. This trend is observed in RCP4.5, wherein, despite an increase in the extreme precipitation value, the runoff has decreased. In RCP8.5 (with higher extreme precipitation), the runoff has increased. The reason for this change is that the occurrence of extreme precipitation in RCP4.5 was during the summer and early autumn seasons, wherein, despite high evapotranspiration and no snow melting (unlike RCP8.5, which coincides with snow melting in the spring), the runoff is less than the subsequent scenario.

Considering the final map, 154 villages with a population of approximately 138,548 individuals are exposed to high flood risk. The largest area corresponds to the category with relatively severe flood susceptibility, equivalent to 2,725 square kilometers. The category with high potential covers 2,607 square kilometers, the category with relatively low potential covers 1,654 square kilometers, the category with very high flood susceptibility covers 901 square kilometers, and finally, the category with low flood susceptibility covers 705 square kilometers of the total area of the Gorgānrud watershed. Furthermore, it can be concluded that more than 85% of the basin area are exposed to the risk of severe flooding.

Conclusion

The results of simulation of stream-flow by SWAT: The results for the SRA1B scenario showed a predicted increase in stream-flow by 1.21% for the month of May. On the other hand, the same scenario predicts a decrease in stream-flow by 2.13% for October. According to the SRA1B scenario, a decrease in stream-flow by 9.2% and

63.38% has been predicted for May and October, respectively. Results of modeling and predicting precipitation under climate change conditions: Climate change scenarios based on the HadCM3 model indicated the highest temperature changes in June, August, and February for different months of the year. This indicates a warming trend in the warmer months of the year and even a warmer February in future periods. Comparing the average monthly temperatures between the baseline period and the simulated data using the HadCM3 model in the region showed that June and August will be accompanied by an increase in temperature in future periods, while temperatures will decrease in April and May, which can be examined from various aspects. Comparing the maximum and minimum temperatures between the baseline period and the simulated data using the HadCM3 model in the Gorgānroud watershed also indicates a warming trend in the warmer months of the year, confirming the discussed subject. The results indicated that both maximum and minimum temperatures at the stations will increase in the future period. Results of precipitation trend analysis using the Kendall method: The obtained results of these time series precipitation plots (1989 to 2018) indicated three different types of changes. From the analysis of the U-U' curves, it can be concluded that only in Aliābad Katoul, the two curves have crossed each other outside the range of ± 1.96 and moved in opposite directions, indicating a shift. Results of the interpolation section: By comparing the root mean square error with the mean error in the data obtained from the overall validation in ordinary kriging, simple kriging, and universal kriging, it is expected that the mean square error and root mean square error would be significantly higher. Given that the accuracy evaluation results of the examined methods have been provided, the universal kriging method with the lowest mean standard error of estimation (0.006) and root mean square error (23.73) was considered the best method for interpolation.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the persons for scientific consulting in this paper.

Citation:

Panāhi, A., Jānbāz Ghoādi, G. h. R., Motavalli, S., and Khāledi, S. h. (2023). Measurement and Prediction of the Potential Occurrence of Floods Under Climate Change Conditions (Case study: Gorgānroud watershed). *Geographical Studies of Coastal Areas Journal*, 4 (13), pp. 45-61. DOI: 10.22124/GSCAJ.2023.22411.1172

Copyrights:

Copyright for this article are retained by the author(s), with publication rights granted to *Geographical studies of Coastal Areas Journal*. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود)*

عبدالحافظ پناهی^۱، غلامرضا جانباز قبادی^{۲*}، صدرالدین متولی^۳، شهریار خالدي^۴

۱. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

۲. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، واحد نور، دانشگاه آزاد اسلامی، نور، ایران.

۴. استاد گروه علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

DOI: 10.22124/GSCAJ.2023.22411.1172

DOR: 20.1001.1.27831191.1402.4.2.3.1

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱

چکیده

مدیریت سیلاب رویکرد جامعی است که شامل شاخص‌های متعدد ارزیابی در حوضه آبخیز رودخانه‌ها و یک روش مؤثر و پایدار ولی پیچیده می‌باشد. ارزیابی خطر سیلاب به منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری و مواجهه با خطر، اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت سیلاب فراهم می‌کند. روش پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسأله و موضوع مورد بررسی، از نوع توصیفی - تحلیلی است و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است، در تحقیق حاضر تغییرات منطقه‌ای سیلاب در حوضه آبخیز گرگانرود با کارگیری اطلاعات ایستگاه‌های سازمان هواشناسی (سینوپتیک) با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷)، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافیک، شیب، ارتفاع، لیتولوژی زمین، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، فرسایش، خاک‌شناسی، رواناب، داده‌های شبیه‌سازی شده میانگین بارش حاصل از مدل HadCM3 در LARS-WG تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵ برآورد شده است. در این تحقیق در دو بخش متفاوت که در روش اول از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس نمائی جهت پیش‌بینی اقلیم آینده (نزدیک و دور) و در بخش دوم از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای ارزیابی خطر سیل استفاده شد و با توجه به درصد خطرات احتمالی در حوضه آبریز گرگانرود در محیط نرم افزار SWAT و GIS پهنه‌بندی صورت گرفت. در این پژوهش بر اساس مدل SWAT مقادیر بارش روزانه و دمای روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک واسنجی گردید. نتایج نشان داده‌اند که تغییر اقلیم و ساختار محیط طبیعی در منطقه پیامدها و اثراتی از جمله تغییر الگوی بارش، به‌وجود آمدن ناهمگنی در سری داده‌های تاریخی، تغییر سطح آب رودخانه‌ها و کاهش تولیدات کشاورزی، تغییر در ترکیب و تولید گیاهی مراتع، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، بروز مشکلات اجتماعی و اقتصادی و ... به‌وجود آورده است. برخی از رفتارها در سری‌های زمانی عناصر اقلیمی ناگهانی، شدید و ناپایدار بوده و به شکلی غیرمترقبه دیده می‌شوند. عوامل فیزیوگرافی همچون شیب، بافت خاک، کاربری اراضی و نفوذپذیری سنگ‌ها موجب پاسخ‌های هیدرولوژیکی متفاوت به رخداد بارش در حوضه‌های مختلف منطقه شده و این امر بر ایجاد و ویژگی‌های سیلاب ناگهانی تأثیرگذار بوده است.

واژگان کلیدی: تغییرات اقلیمی، خطرپذیری سیلاب، مدل‌سازی، GIS، SWAT، گرگانرود.

نکات برجسته:

- وقوع سیلاب‌های شدید، خشک‌شدن تالاب‌های شمال استان گلستان و رودخانه‌ها، و وقوع پدیده ریزگرد از اثرات مستقیم تغییرات اقلیمی است.
- وقوع تغییرات اقلیمی در آینده نمود بیشتری خواهد داشت لذا تحلیل و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود) می‌باشد که با راهنمایی اول نویسنده دوم و با راهنمایی دوم نویسنده سوم و مشاوره نویسنده چهارم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور دفاع شد.

* نویسنده مسئول: gghobadi@yahoo.com

۱. مقدمه

سیل یکی از پدیده‌های طبیعی و از مخاطرات بسیار مهم و مخرب در سطح جهان محسوب می‌شود که همه ساله با تلفات جانی و مالی در گوشه و کنار دنیا و ایران همراه است (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۸). از بین رفتن پوشش گیاهی در اثر عدم درک صحیح از مدیریت منابع موجود، نبود جایگاهی برای آن در سیاست‌گذاری‌های کلان و شرایط اقتصادی حاکم بر عرصه و بهره‌وری بیش از ظرفیت طبیعی منابع موجود شرایطی را فراهم نموده است که هر ساله شاهد بروز سیلاب و اثرات تخریبی آن و از دست رفتن میلیون‌ها تن خاک ارزشمند می‌باشیم. بر همین اساس کاهش و مهار نسبی خطرات سیلاب یکی از چالش‌های عمده مدیریت کشور است. یکی از راهکارهای کاهش خسارت سیلاب، پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه‌های آبریز است (عسگری و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به اهمیت این موضوع و بعضاً اثرات منفی آن بر پوشش گیاهی، مقابله با تغییر اقلیم مستلزم ارائه راهکارهایی برای سازگاری با شرایط آینده است. با وجود آن‌که علل واقعی تغییرپذیری اقلیمی به‌طور کامل شناخته‌نشده است، لیکن فرضیه‌هایی به‌عنوان عوامل مؤثر در تغییرات اقلیم مطرح شده‌اند که نتیجه تمام این فرضیه‌ها، تغییر پارامترهای درجه حرارت و بارش است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷: ۴۰). تغییر اقلیم دارای پیامدها و اثراتی در بروز پدیده گرمایش جهانی، کاهش تولیدات کشاورزی، تغییر در تنوع و پوشش گیاهی مراتع، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، بروز مشکلات اجتماعی و اقتصادی و ... است (زارعی و همکاران، ۱۳۹۷: ۴۲۶). از عوامل اصلی جاری شدن سیل در شهرها بارش نزولات جوی با شدت بالا و به‌صورت طولانی مدت می‌باشد (نگهبان، ۱۳۹۷). مدل‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی اهمیت ویژه‌ای در برنامه‌ریزی محیطی دارد (عادل‌پور و ناد، ۱۳۹۷: ۱۱۳). پهنه‌بندی سیل، جهت مشخص کردن میزان خطرپذیری به سیلاب برای استفاده‌کنندگان متحمل سیل، شناسایی ناحیه‌ها برای بیمه سیل و ایجاد محدودیت‌های اجباری کاربری در مناطق خطرپذیر قابل استفاده هست (قاسمیان، ۱۳۹۸).

هدف کلیدی پژوهش حاضر مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر وقوع منطقه‌ای سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم تحلیل فازی، تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل SWAT در حوضه‌های آبخیز استان گلستان است. به‌دلیل بالا بودن ضریب تغییرپذیری زمانی و مکانی بارش در منطقه استان گلستان، شناخت منابع آب و متغیرهای محیطی و بررسی آن‌ها که عمدتاً حاصل ریزش‌های جوی است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، ما به‌دنبال آشکارسازی نقش اثرات تغییر اقلیم بر تغییرات سیلاب حوضه آبریز گرگانرود در استان گلستان و پیش‌بینی روند تغییرپذیری این فرایند برای دهه‌های آینده می‌باشیم. بطوری که با پیش‌بینی‌های مناسب از تغییرات بارش در این ناحیه مطالعاتی می‌توان، مدیریت ریسک را جایگزین مدیریت بحران در عرصه‌های طبیعی، روستایی و شهری و همچنین حفاظت از این سرمایه ملی اعمال نمود. بر اساس اهداف تحقیق سوالات اصلی پژوهش حاضر بدین شرح می‌باشند:

- بر اساس سناریوی تغییر اقلیم خطر وقوع سیلاب در حوضه آبخیز گرگانرود چگونه است؟
- بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم احتمال وقوع سیلاب در حوضه‌های گرگانرود زیاد است.

۲. مبانی نظری

چارچوب نظری از مراحل اساسی علم روش تحقیق است که بر مبنای نظریه‌های خاص، پدیده را بررسی می‌نماید. این مرحله از مراحل تعیین‌کننده روش تحقیق است که به اثبات قواعد منطقی و همبستگی بین پدیده‌های مورد مطالعه در آن تحقیق می‌پردازد. هدف کلی این تحقیق پهنه‌بندی و مدل‌کردن مناطق تحت خطر و ریسک سیلاب برای اقلیم در حال تغییر می‌باشد. رویکرد حاکم بر تحقیق، رویکرد تغییر اقلیم و اثرات آن بر هیدرولوژی حوضه آبخیز گرگانرود می‌باشد. مسئله تغییر اقلیم یکی از چالش‌هایی است که اثر منفی بر روی اکوسیستم‌های آبی و خشکی دارد. عواملی مانند گردش وضعی زمین، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی، چرای بیش‌ازحد دام در مراتع، روش‌های آبیاری نامناسب و افزایش گازهای گلخانه‌ای در بروز پدیده تغییر اقلیم نقش دارند (گندمکار و همکاران، ۱۳۹۳).

بارش یکی از پدیده‌های اقلیمی است که به علت وابستگی زندگی موجودات زنده به آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این اهمیت زمانی آشکارتر می‌شود که در یک منطقه با کمبود ریزش و یا با ریزش ناگهانی روبرو شویم. در واقع بارش پدیده‌ای اقلیمی

است که به دلیل پیوند با اجزاء مختلف دستگاه، اقلیم رفتاری پیچیده دارد. تدوین و تکوین این پژوهش می‌تواند راه‌گشای مطالعات بعدی باشد و نیز در برنامه‌ریزی‌های سازمان‌های آب منطقه‌ای، هواشناسی، منابع طبیعی، جهادکشاورزی، محیط‌زیست، راه و ترابری و کلیه کاربران اقلیم در جهت توسعه پایدار منطقه، مؤثر واقع گردد. در واقع امکان برنامه دقیق‌تر مدیریت منابع آب منطقه و کمک به محاسبه دقیق‌تر بارش منطقه در کنار متغیرهای محیطی دیگر از جمله مزایای این پژوهش است. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه پدیده بارش در منطقه استان گلستان و ایران صورت گرفته است ولی هیچ‌کدام این متغیر اقلیمی را با دیدگاه تغییرپذیری اقلیمی همراه با متغیرهای محیطی به صورت تلفیقی بررسی نکرده‌اند که شرح مختصری از این پژوهش‌ها در ذیل اشاره می‌شود.

۳. پیشینه پژوهش

تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه پدیده بارش در منطقه استان گلستان و ایران صورت گرفته است ولی هیچ‌کدام این متغیر اقلیمی را با دیدگاه تغییرپذیری اقلیمی همراه با متغیرهای محیطی به صورت تلفیقی بررسی نکرده‌اند که شرح مختصری از این پژوهش‌ها در ذیل اشاره می‌شود.

فلونی^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، محدوده‌های سیل‌خیز منطقه آتیکا در یونان را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در GIS شناسایی نمودند. آنها چارچوبی را پیشنهاد دادند که در آن عمدتاً داده‌هایی نظیر توپوگرافی، پوشش زمین و مواردی از این دست در مطالعات مدنظر قرار گیرد. کیم^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، تحقیق پهنه‌بندی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله رودخانه مکنونگ پایین کامبوج تایلند را انجام دادند و عنوان کردند که با استفاده از روش‌های موجود در محیط GIS می‌توان خطرپذیری سیلاب را در حوضه‌های آبخیز برآورد کرد. کاستریدیس^۳ (۲۰۲۰)، در تحقیقی با عنوان «یک رویکرد یکپارچه از تجزیه و تحلیل سیلاب در حوضه‌های آبریز مدیترانه با استفاده از نظرسنجی‌های پس از سیل و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها)» به مطالعه رویداد سیل ناگهانی دو جریان زودگذر غیرمنتظره در منطقه المپیدا (یونان شمالی) که در ۲۱ تا ۲۲ نوامبر ۲۰۱۹ رخ داده است، پرداخت. نتایج حاصل از این رویکرد نشان داد مداخله انسان در جریان‌های اصلی، پراکندگی شهری، AMC مرطوب و حمل و نقل رسوب از اصلی‌ترین عواملی است که در ایجاد سیلاب چشم‌انداز مؤثر بوده است. این رویکرد یکپارچه، ضرورت ارزیابی و اعتبارسنجی مداوم مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را در حوضه‌های آبریز کوچک دریای مدیترانه و جریان‌های زودگذر آشکار کرد. جیا^۴ و همکاران (۲۰۱۹)، پژوهشی را با عنوان پهنه‌بندی خطر سیل بر اساس فرایند تحلیلی سلسله مراتبی و مجموعه متغیرهای فازی انجام داده‌اند و در نهایت مناطق در معرض بیشترین خطر سیل را نام برده‌اند. یودینگ^۵ و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی به ارزیابی خطر سیلاب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (مطالعه موردی: بانگرگام در تایلند) پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مناطق بسیار خطرناک سیل در نزدیکی شبکه زهکشی یافت شده است. همچنین فاکتورهای تأثیرگذار مهم در معرض خطر سیلاب به ترتیب شامل؛ انباشت جریان، ارتفاع و نفوذ آب خاک (همان وزن)، فاصله از شبکه زهکشی، متوسط باران سالیانه، تراکم زهکشی، کاربری زمین و شیب بوده است. در تحقیقی که ملینسکی^۶ و همکاران (۲۰۱۹) بر روی رودخانه ویستولا در کشور لهستان انجام داد، حداکثر آورد سالیانه رودخانه به‌وسیله پارامترهای فیزیوگرافی حوضه بالادست رودخانه برای ۴۱ ایستگاه بررسی گردید. نتایج نشان داد که مهم‌ترین پارامترهای فیزیوگرافی حوضه مؤثر بر سیل، شامل مساحت زیر حوضه، اختلاف ارتفاع، شبکه آبراه‌های حوضه بودند. اقبال^۷ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی سیل در حوضه رودخانه کابل برای دو دوره ۲۰۵۰-۲۰۳۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ با چهار مدل اقلیمی تحت سناریو RCP8.5, RCP4.5 پرداختند. برای شبیه‌سازی رواناب‌های سالانه حداکثر از مدل SWAT استفاده کردند. برای انجام تحلیل فرکانس از مدل HEC-SSP استفاده کردند. نتایج تحقیق، نشان‌دهنده افزایش دما و بارش بود. همچنین بررسی

1. Feloni
2. Kim
3. Kastridis
4. Jia
5. Yodying
6. Mlinsky
7. Iqbal

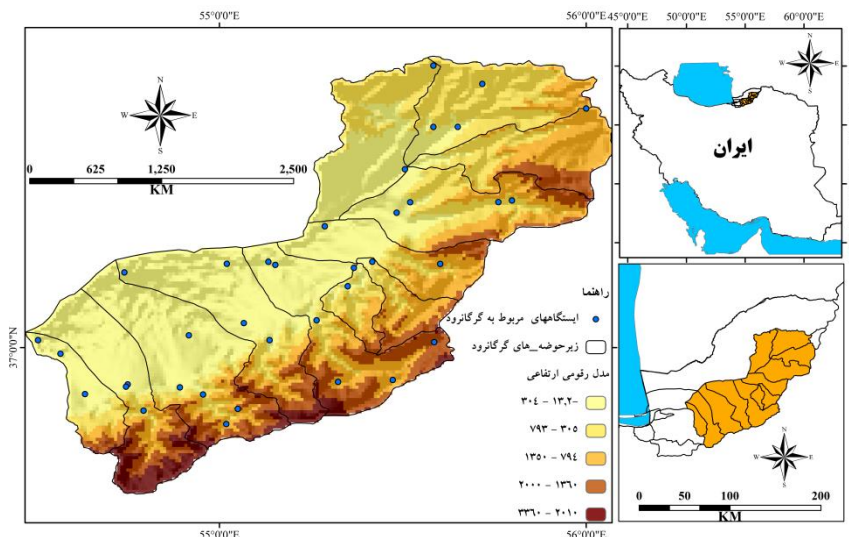
فراوانی سیل افزایش شدت و کاهش دوره بازگشت سیل را نشان داد که در RCP8.5 این مقادیر بیشتر از RCP4.5 بود. چری (۲۰۱۳) در تحقیق خود در ارتباط با ریز مقیاس‌نمایی و مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم در هیدرولوژی و منابع آب حوضه رودخانه نیل با استفاده از روش LARS-WG و SWAT که در آن تحلیل تأثیرات احتمالی تغییرات آب و هوایی آینده بر منابع آب در دو بخش پیش‌بینی و مدل‌سازی با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های نزولی از سه مدل GCM (ECHAM5, GFDL21 و CSIRO-MK3) تحت سناریوهای SRES و LARS-WG اعمال می‌شود. برای دوره زمانی آینده ۲۰۵۰ پیش‌بینی آب و هوا نشان می‌دهد: افزایش دما از $C 0/6$ به $C 2/7$ برای دمای حداکثر فصلی Tmax، و برای حداقل $C 0/5$ تا $C 2/44$ است در نتیجه این افزایش‌ها به طور کلی برای A2 بیشتر از میزان A1B است و در مدل SWAT برای پیش‌بینی جریان بالای رود نیل و همچنین سایر پارامترهای مربوط به منابع آب در حوضه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های بعدی جریان در حوضه با استفاده از هر دو LSD و LARS-WG در SWAT، نشان‌دهنده کاهش ۱۰٪- به ۶۱٪- جریان آبی رود نیل می‌باشد. کیم (۲۰۱۳) با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی روی جریان رودخانه در حوضه Hoeya تحت سناریوهای جدید انتشار از گزارش ارزیابی پنجم هیات بین‌المللی تغییرات اقلیمی IPCC، با استفاده از مدل SWAT بیان کردند جریان رودخانه در فصل بهار و زمستان افزایش یافته اما در تابستان و پاییز کاهش یافته است. نفرزادگان و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی تحت عنوان ادغام مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک تجزیه و تحلیل منطقه‌ای سیلاب جهت اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای کنترل سیل (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دهبار خراسان) به این نتیجه رسیده‌اند که بررسی پارامترهای مؤثر در بروز سیل از طریق رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) می‌تواند در تعیین نقش هر یک از زیرحوضه‌ها در بروز سیلاب راه‌گشا باشد. گودرزی و فاتحی‌فر (۱۳۹۸) در تحقیق پهنه‌بندی خطر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP 8.5 با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (حوضه آذر شهر چای) با استفاده از مدل گردش عمومی CAN ESM2 تحت جدیدترین سناریو و متغیر دما و بارش آماری SDSM ریز مقیاس‌نمایی شده و با روش هیدرولوژیکی SWAT نقشه حوضه‌بندی و خطوط آبراهه‌ها حاصل گردیده است. نتایج ارزیابی مدل SDSM با ضریب تعیین و نش-ساختکلیف ۹۵٪، به طور متوسط بیانگر عملکرد خوب مدل در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ مقیاس است. همچنین افزایش ۲۳٪، درجه سانتیگراد دما و ۴/۵۳ درصدی بارش و دبی‌های حداکثر در دوره آبی ۲۰۳۰-۲۰۵۹ پیش‌بینی شده است. با مدل SWAT نقشه‌های پایه تحلیل و حوضه با تلفیق نقشه متوسط دبی حداکثر، ضریب شکل حوضه و فاصله از رودخانه که با رویکرد AHP پهنه‌بندی شده است. با توجه به پهنه‌بندی ۴۱/۵۵ درصد از مساحت حوضه در خطر بسیار کم و کم، ۲۷/۲۳ درصد خطر و ۳۱/۲ درصد در خطر زیاد و بسیار زیاد می‌باشد. همچنین با نقشه نهایی مشخص شد که اواسط حوضه به دلیل داشتن شرایط مستعد دارای خطر زیاد است و نیاز به انجام اقدامات مدیریتی دارد. خوش‌روش و رضایی (۱۳۹۵) در پژوهشی تحت عنوان اثر تغییر اقلیم بر فراوانی سیلاب حوضه کلاردشت با استفاده از تلفیق الگوریتم K-nn و مدل HadCM3 به این نتیجه رسیده‌اند که بر اساس تحلیل فراوانی سیل، دبی سیل در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ با دوره بازگشت ۲۵ ساله در کل حوضه، نسبت به دوره پایه، ۲۱ درصد کاهش دارد. بحری و دستورانی (۱۳۹۶) در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز اسکندری به این نتیجه رسیده‌اند که علاوه بر تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی به‌عنوان یک عامل جانبی اثرات مهمی بر سیلاب دارد. لذا پیش‌بینی اثر این دو پارامتر بر وضعیت سیلاب دهه‌های آتی، راه‌گشای مقابله با این پدیده خواهد بود.

با جمع‌بندی پیشینه کارهای انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت بررسی تغییرات بارش، دبی سیلاب رودخانه در اثر پتانسیل تغییرات اقلیمی در آینده، همچنین بررسی معیارهای طبیعی بینش ارزشمندی می‌دهد که چگونه سطح حوضه آبخیز به این تغییرات واکنش نشان می‌دهد و مدیران را در اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر روند سیل‌خیزی حوضه آبخیز گرگانود به‌منظور برنامه‌ریزی جهت کنترل سیلاب یاری می‌کند. نتایج یافته‌های تحقیقات دانشمندان گویای این نظر است که وقوع تغییرات اقلیمی در آینده نمود بیشتری خواهد داشت. لذا تحلیل و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وقوع تغییرات اقلیمی در یک منطقه با عوامل مختلفی ارتباط دارد و روش‌های متعددی برای مطالعه این پدیده به‌کار گرفته شده است. در این تحقیق به بررسی وقوع سیلاب تحت شرایط تغییرات اقلیمی و ارزیابی خطرات احتمالی آن پهنه‌بندی، ابعاد و پیامدهای زیانبار

آن پرداخته خواهد شد. تحقیقات پژوهشگران طی سال‌های گذشته نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی اثرات متفاوتی بر روی مؤلفه‌های اقلیم و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی دارد که باعث ایجاد خشکسالی و یا سیلاب می‌گردد. برای نمونه ایجاد سیلاب‌های مخرب سالهای ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در کشور خصوصاً در استان گلستان نیاز به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی عناصر اقلیمی و عناصر هیدرولوژیکی حوضه آبخیز را حائز اهمیت و در اولویت قرار می‌دهد. استان گلستان یکی از نقاط سیلاب‌خیز کشور بوده که تجربه‌های بسیار سختی از سیلاب طی سالیان متمادی در آن وجود دارد. با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی و یافته‌های متفاوت از روند تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی‌های آینده دور و آینده نزدیک، نیاز در این است که از ترکیب و ادغام یافته‌های چندین مدل مثل ریز مقیاس‌نمائی LARS-WG، SDSM و... استفاده شود و نیز از فنون و مدل‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS در جهت ترسیم و تهیه نقشه‌ها جهت پهنه‌بندی و بررسی و ترکیب نتایج یافته‌ها به‌کار گرفته شود. در این پژوهش در دو بخش متفاوت که در روش اول از مدل LARS-WG برای ریز مقیاس‌نمائی جهت پیش‌بینی اقلیم آینده (نزدیک و دور) و در بخش دوم از مدل هیدرولوژیکی SWAT برای ارزیابی خطر سیلاب استفاده شد و با توجه به درصد خطرات احتمالی در حوضه آبریز گرگانود در محیط نرم افزار SWAT و GIS پهنه‌بندی گردید.

۴. روش پژوهش

حوضه آبریز گرگانود با مساحت ۱۰۱۹۷ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های شمال‌شرق کشور بوده که بخش وسیعی از آن در استان گلستان واقع است. این حوضه از جنوب مشرف به سلسله‌جبال البرز شرقی، از شرق به کوه‌های آلاداغ و گلی‌داغ، از شمال به حوضه آبریز اترک و از غرب به دریای خزر و حوضه آبریز قره‌سو محدود می‌شود. این حوضه در محدوده مختصات جغرافیایی طول شرقی ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه محصور گردیده است. شکل ذیل موقعیت حوضه آبریز گرگانود در ایران و استان گلستان نشان می‌دهد. حوضه آبخیز گرگانود از لحاظ اقلیمی بسیار متنوع بوده و بر طبق طبقه‌بندی این حوزه دارای اقلیم‌های مرطوب، نیم مرطوب، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و خشک است. همچنین عموماً در کلیه مناطق حوضه ماه‌های آذر، دی و به‌ویژه بهمن و اسفند، مرطوب‌ترین و خرداد لغایت شهریور، خشک‌ترین ماه‌های سال است (منبع: مطالعات آمایش استان گلستان، ۱۳۹۵).



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه

پژوهش حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع توصیفی - تحلیلی و از نوع مطالعات کاربردی با تأکید بر روش‌های کمی است. در این تحقیق، تغییرات منطقه‌ای سیلاب در حوضه آبخیز گرگانود بر اساس به‌کارگیری اطلاعات ایستگاه‌های سازمان هواشناسی (سینوپتیک) با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷)، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، شاخص رطوبت توپوگرافیک، شیب، ارتفاع، لیتولوژی زمین، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، فرسایش، خاک‌شناسی، رواناب، داده‌های

شبیه‌سازی شده میانگین بارش حاصل از مدل HadCM3 در LARS-WG تحت سناریو SRA1B بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵ برآورد شده است. دلیل اینکه کلیه نتایج مدل در این پژوهش ارائه نشد، حجم زیاد موارد بود. پس از محاسبه فاکتور بارش برای ایستگاه موردنظر از طریق نرم‌افزار Excel، با استفاده از روش‌های درونیایی روش عکس فاصله و کریجینگ، نقشه تغییرات منطقه‌ای بارش منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGis ترسیم گردید. بدین منظور جهت بهترین نتیجه و کمترین میزان خطا از روش میانیایی کریجینگ بیزی با پراکنش (Exponential) و جهت انتخاب بهترین روش درونیایی از شاخص‌های آماری از قبیل RMSE، MSE و ME استفاده گردید. یکی از مهم‌ترین راهبردهای موجود در زمینه وزن‌دهی تکنیک‌های کمی و ریاضی است. در پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP) در محیط نرم‌افزار Excel معیارهای متناسب و سازگار را مورد ارزیابی قرار دادیم و در ادامه برای اجرای فرایند پهنه‌بندی سیلاب منطقه‌ای از روش تحلیل فازی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره گرفته شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب جهت آنالیز پارامتر بارش

ردیف	نام ایستگاه	LAT	Lon
۱	علی‌آباد کتول	۵۴/۸۸	۳۶/۹۰
۲	بندرگز	۵۳/۹۵	۳۶/۷۷
۳	بندرترکمن	۵۴/۰۷	۳۶/۹۰
۴	گلوگاه	۵۳/۸۲	۳۶/۷۸
۵	گنبد کاووس	۵۵/۱۷	۳۷/۲۵
۶	گرگان	۵۴/۴۱	۳۶/۹۱
۷	هاشم‌آباد گرگان	۵۴/۲۷	۳۶/۸۵
۸	اینچه برون	۵۴/۲۹	۳۷/۴۵
۹	کلاله	۵۵/۴۶	۳۷/۳۹
۱۰	مراوه تپه	۵۵/۹۵	۳۷/۹۰
۱۱	مینودشت	۵۵/۶۳	۳۷/۳۷

منبع: اداره کل هواشناسی استان گلستان، ۱۳۹۹.

در این تحقیق بعد از انتخاب مدل واریوگرام و درونیایی انجام‌شده توسط روش‌های مورد بررسی، صحت این درونیایی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. روش‌های عمده‌ای که در بررسی صحت درونیایی استفاده می‌شود شامل صحت‌یابی (validation) و صحت‌یابی سرتاسری است که در روش اول یک منطقه تعلیمی (Training) و یک منطقه آزمایش انتخاب می‌شود. در ابتدا برای منطقه تعلیمی رابطه درونیایی به دست می‌آید. سپس برای منطقه آزمایش به کار می‌رود و میزان دقت برآورد محاسبه می‌گردد. معیارهای ارزیابی استفاده‌شده در این مطالعه براساس پارامترهایی از قبیل RMSE، ME، ASE، MSE و تعریف می‌شوند. مهم‌ترین معیار برای ارزیابی تخمین، مقدار مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) می‌باشد. (ME) میانگین خطاها یا میانگین اختلاف بین مقدار تخمین زده‌شده و مقدار مشاهده‌شده در نقطه i ام می‌باشد و می‌تواند به وسیله معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$ME = E[Z^*_i - Z_i]$$

مجذور میانگین مربع خطا است و به صورت معادله زیر محاسبه شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Z^*_i - Z_i)^2}{n}}$$

که N تعداد مشاهدات می‌باشد.

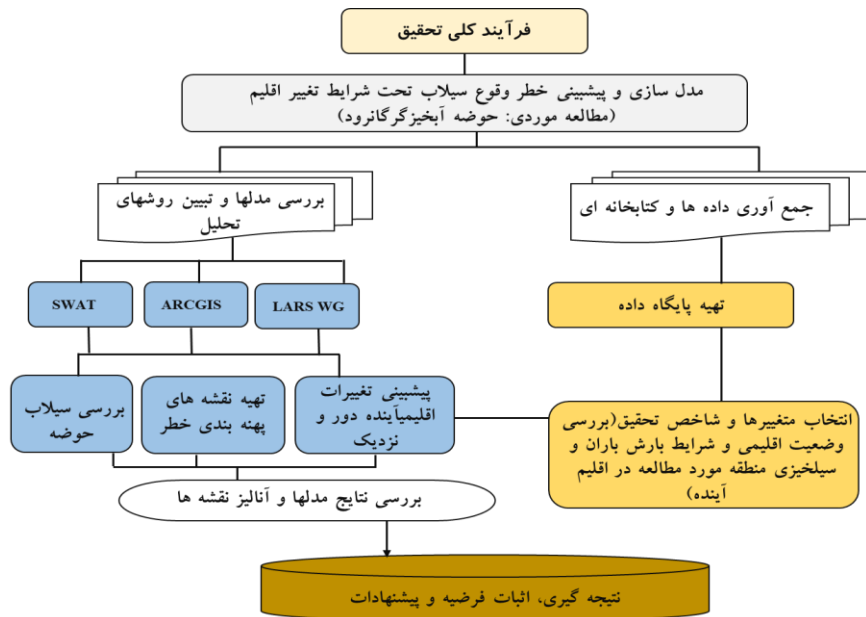
MSE: میانگین استاندارد شده خطا است که به صورت معادله زیر تعیین می‌شود.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Z^*_i - Z_i}{Standard\ error}}{n - 1}$$

مدل SWAT: مدل SWAT یک Extension تحت نرم‌افزار ArcGIS می‌باشد که به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی اصلی شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، نفوذ عمقی، جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی توسط مدل شبیه‌ساز می‌پردازد. این مدل در جهت مدل‌سازی مدیریت آب، سموم و رسوب در مقیاس حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ورودی‌های این مدل شامل داده‌های هواشناسی، جنس و ترکیبات خاک هر منطقه، نوع کاربری زمین در منطقه، نوع پوشش گیاهی منطقه، مقادیر شیب و طول شیب در نواحی مختلف می‌باشد که به طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده می‌شود. مدل SWAT مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که توسط Jeff Arnold برای اداره خدمات تحقیقات کشاورزی آمریکا ارائه شده است. این مدل برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه آبریز پیچیده و بزرگ با انواع خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. SWAT مدلی فیزیکی می‌باشد که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، نیازمند اطلاعاتی در مورد آب‌وهوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و مشابه آن در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند (Zhixiang, 2015). متغیرهای مکانی ورودی مدل SWAT در این تحقیق شامل لایه‌های اطلاعاتی مدل رقومی ارتفاع (DEM)، لایه خاک همراه با اطلاعات بافت خاک و لایه کاربری اراضی همراه با اطلاعات توصیفی آن است. متغیرهای هیدروکلیماتولوژی و عددی ورودی مدل SWAT شامل مقادیر روزانه بارش، درجه حرارت حداقل و حداکثر مربوط به ایستگاه‌های داخل و خارج حوضه و متوسط رواناب روزانه خروجی حوضه به همراه موقعیت‌های جغرافیایی آن‌ها می‌باشد. شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده با استراتژی‌های مختلف مدیریتی، بدون صرف هزینه و زمان زیاد، قابل انجام می‌باشد و این امکان را به کاربر می‌دهد تا اثر بلندمدت برخی از عوامل از جمله آلودگی و فرسایش را بررسی نماید. نحوه انجام کالیبراسیون و اعتبارسنجی در این نرم‌افزار بدین صورت بوده است که بر اساس ۲۰ پارامتر حساس انتخاب‌شده به شرح جدول شماره ۲ شبیه‌سازی صورت گرفت.

جدول ۲. پارامترهای حساس انتخاب‌شده و محدوده تغییرات آن‌ها

شماره ردیف	نام پارامتر	حداقل مقدار	حداکثر مقدار
۱	r_CN2.mgt	-۰/۳	۰/۴
۲	v_ALPHA_BF.gw	۱	۳
۳	v_GW_DELAY.gw	۵۰	۳۶۰
۴	v_GWQMN.gw	۱	۳
۵	r_ESCO.hru	۰/۶۵۸	۲/۰۴۵
۶	r_GW_REVAP.gw	۰/۳	۰/۳۲۱
۷	r_CH_K2.rte	-۱۱/۴۷۹	۵۶/۳۶۷
۸	r_CH_N2.rte	۰/۳۱۴	۰/۵۶۲
۹	r_ALPHA_BNK.rte -	-۰/۱۶۷	۰/۴۹۶
۱۰	r_SOL_AWC().sol	-۰/۳	۱/۹
۱۱	r_EPCO.hru	-۰/۳	۰/۴
۱۲	r_SOL_K().sol	۰/۲	۳
۱۳	r_PLAPS.sub	۰	۱۰۰
۱۴	r_RCHRG_DP.gw	۰	۳
۱۵	r_REVAPMN.gw	۰	۷۰۰
۱۶	r_SMTMP.bsn	-۳	۳
۱۷	r_SMFMN.bsn	۰	۱۰۰
۱۸	r_REVAPMN.gw	۰	۷۰۰
۱۹	r_SMFMX.bsn	۰	۱۰۰
۲۰	r_TIMP.bsn	۰/۱	۱



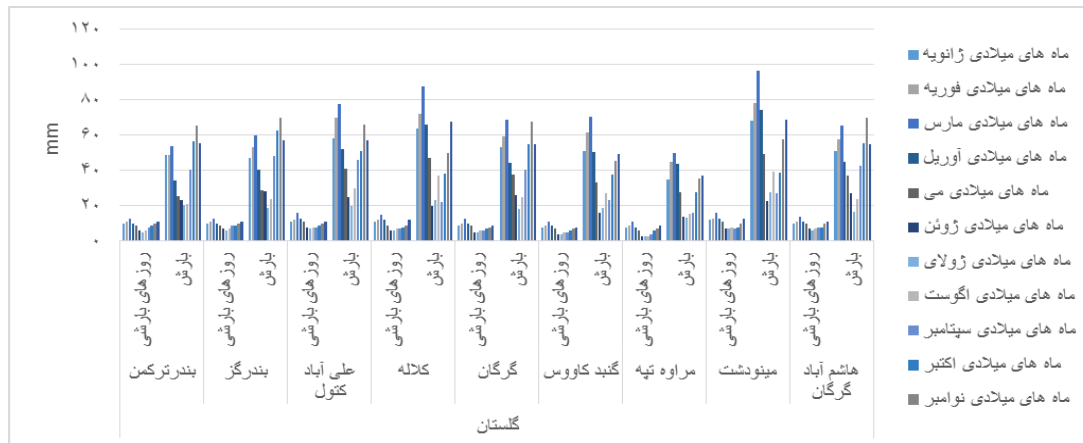
شکل ۲. فرایند تحقیق پهنه‌بندی منطقه‌ای سیلاب با استفاده از روش سلسله‌مراتبی و مدل هیدرولوژیکی SWAT

۵. یافته‌های پژوهش و بحث

با توجه به تعداد بالای ایستگاه‌های موجود در منطقه و نحوه توزیع مناسب آن‌ها، شاهد نقشه پهنه‌بندی کاملی از منطقه می‌باشیم. بررسی مقدار بارش در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که رژیم بارش در نواحی مختلف دارای رفتارهای متفاوتی است. بطوری‌که مطابق جدول شماره ۳، مشخص می‌گردد در استان گلستان بیشترین مقدار بارش در ایستگاه مینودشت معادل ۶۴۹ میلیمتر در سال و کمترین آن نیز در مراوه تپه معادل ۳۶۱ میلیمتر است. از طرف دیگر مشخص می‌گردد که بارش ایستگاه مینودشت از متوسط ۱۲۵ روز و مراوه تپه ۷۷ روز حاصل شده است.

جدول ۳. میانگین ماهانه بارش و تعداد روزهای بارشی ایستگاه‌های استان گلستان ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۶

ایستگاه	بارش	ماه‌های میلادی											
		ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مئ	ژوئن	ژوئیه	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
بندرترکمن	روزهای بارشی	۱۰	۱۱	۱۳	۱۰	۹	۶	۵	۶	۸	۹	۱۰	۱۱
	بارش	۴۸/۹	۴۹	۵۴	۳۴/۶	۲۵/۶	۲۳۳	۲۰/۷	۲۰/۷	۴۰/۷	۵۶/۵	۶۵/۳	۵۵/۴
بندرگز	روزهای بارشی	۱۰	۱۱	۱۳	۱۰	۹	۷	۶	۷	۹	۹	۱۰	۱۱
	بارش	۴۷/۴	۵۳	۵۹/۸	۴۰/۳	۲۸/۹	۲۸/۲	۱۸/۸	۲۳/۶	۴۸/۴	۶۲/۸	۶۹/۷	۵۷/۲
علی‌آباد	روزهای بارشی	۱۱	۱۲	۱۶	۱۳	۱۱	۸	۷	۸	۸	۹	۱۰	۱۱
	بارش	۵۸/۲	۷۰	۷۷/۶	۵۲/۱	۴۱/۳	۲۵	۲۰/۲	۲۹/۸	۴۵/۸	۵۱/۳	۶۵/۸	۵۷/۴
کلاله	روزهای بارشی	۱۱	۱۲	۱۵	۱۲	۹	۶	۶	۷	۷	۸	۹	۱۲
	بارش	۶۳/۸	۷۲/۳	۸۷/۷	۶۶/۲	۴۷/۲	۲۰/۱	۲۳/۵	۳۷	۲۲/۱	۲۲/۱	۵۰/۱	۶۷/۸
گرگان	روزهای بارشی	۹	۱۰	۱۳	۱۰	۹	۵	۵	۶	۶	۷	۸	۹
	بارش	۵۳/۳	۵۹/۲	۶۸/۷	۴۴/۴	۳۷/۵	۲۶/۱	۱۸/۲	۲۴/۷	۴۰/۴	۵۵/۱	۶۷/۹	۵۵/۱
گنبد کاووس	روزهای بارشی	۸	۹	۱۱	۹	۷	۴	۴	۴	۵	۵	۶	۸
	بارش	۵۰/۸	۶۱/۴	۷۰/۳	۵۰/۵	۳۳/۳	۱۶/۳	۱۸/۸	۲۶/۹	۲۳/۱	۲۷/۶	۴۵/۶	۴۹/۵
مراوه تپه	روزهای بارشی	۸	۹	۱۱	۸	۶	۳	۳	۳	۳	۴	۶	۹
	بارش	۳۴/۸	۴۵/۲	۴۹/۸	۴۳/۸	۲۷/۷	۱۳/۸	۱۳/۲	۱۵/۵	۱۶/۱	۲۸	۳۵/۷	۳۷/۱
مینودشت	روزهای بارشی	۱۲	۱۳	۱۶	۱۳	۱۱	۷	۷	۷	۸	۸	۱۰	۱۳
	بارش	۶۸/۲	۷۸/۲	۹۶/۷	۷۴/۳	۴۹/۱	۲۲/۹	۲۷/۶	۳۹/۳	۲۷/۲	۲۹/۱	۵۷/۵	۶۸/۶
هاشم‌آباد	روزهای بارشی	۱۰	۱۱	۱۴	۱۱	۱۰	۷	۶	۶	۷	۸	۱۰	۱۱
	بارش	۵۱/۳	۵۷/۵	۶۵/۲	۴۴/۸	۳۷/۳	۲۷	۱۶/۵	۲۳/۶	۴۲/۷	۵۵/۴	۶۹/۷	۵۴/۹

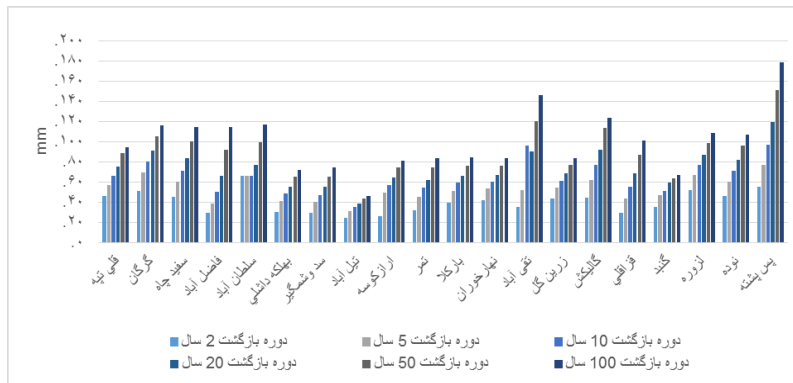


شکل ۳. میانگین بارش و تعداد روزهای بارشی ایستگاه‌های استان گلستان ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۶

مطابق جدول شماره ۳، رفتار ماهانه رژیم بارش نیز در ایستگاه گرگان، گنبدکاووس و مراوه‌تپه حداکثر در ماه مارس و حداقل آن نیز در ماه‌های ژوئن و ژولای رخ داده است. البته لازم به ذکر است که در ایستگاه گرگان در نوامبر نیز مقدار بارش قابل توجه است. بررسی فراوانی روزهای بارشی نیز در ایستگاه‌های فوق‌الذکر در ماه مارس با بالاترین رخداد به ترتیب معادل ۱۳، ۱۱ و ۱۱ روز است. البته در ایستگاه گرگان با وجود مقدار بارش حداکثر در ماه نوامبر، تعداد روزهای بارشی مشابه مارس مشاهده نمی‌شود؛ البته این موضوع می‌تواند حاکی از افزایش شدت بارش‌های پاییز در این منطقه باشد.

جدول ۴. مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت مختلف استان گلستان (میلیمتر)

نام حوزه	نام ایستگاه‌ها	دوره بازگشت				
		۲ سال	۵ سال	۱۰ سال	۲۰ سال	۵۰ سال
گرگانرود	قلی تپه	۴۵/۹	۵۷	۶۶	۷۵/۱	۸۸/۱
	گرگان	۵۱	۶۹	۸۰	۹۱	۱۰۵
	سفید چاه	۴۵	۶۰	۷۱	۸۳	۱۰۰
	فاضل‌آباد	۲۹	۳۸	۵۰	۶۶	۹۲
	سلطان‌آباد	۶۶	۶۶	۶۶	۷۷	۹۹
	بهلکه داشلی	۳۰	۴۱	۴۸	۵۵	۶۵
	سد وشمگیر	۲۹	۴۰	۴۷	۵۵	۶۵
	تیل‌آباد	۲۴	۳۱	۳۵	۳۸	۴۳
	ارازکوسه	۲۶	۴۹	۵۷	۶۴	۷۴
	تمر	۳۲	۴۵	۵۴	۶۲	۷۴
	بارکلا	۳۹	۵۱	۵۹	۶۶	۷۶
	نهارخوران	۴۲	۵۳	۶۰	۶۷	۷۶
	تقی‌آباد	۳۵	۵۲	۹۶	۹۰	۱۲۰
	زرین‌گل	۴۳	۵۴	۶۱	۶۸	۷۷
	گالیکش	۴۴	۶۲	۷۷	۹۲	۱۱۳
	قزاقلی	۲۹	۴۳	۵۵	۶۸	۸۷
	گنبد	۳۵	۴۷	۵۱	۵۹	۶۳
	لژوره	۵۲	۶۷	۷۷	۸۷	۹۸
	نوده	۴۶	۶۰	۷۱	۸۲	۹۶
	پس پشته	۵۵	۷۷	۹۷	۱۱۹	۱۵۱

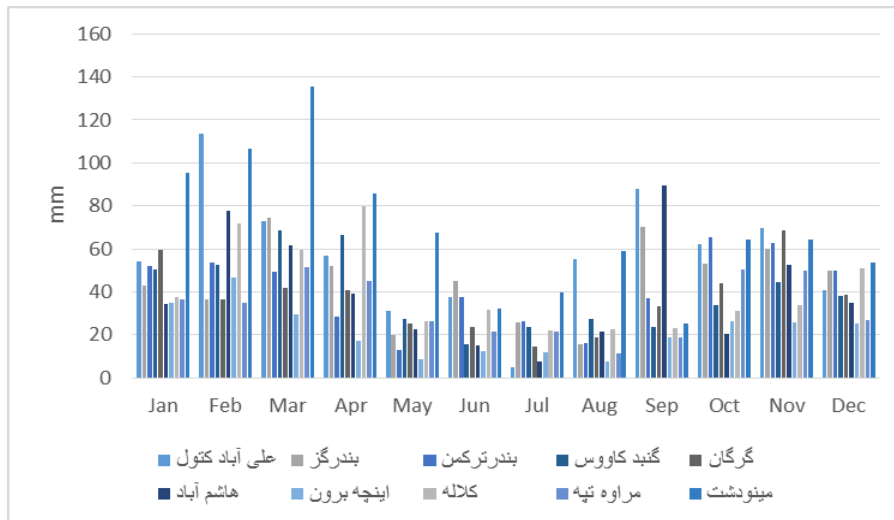


شکل ۴. نمودار دوره‌های برگشت بارش ایستگاه‌های استان گلستان ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۶

دوره‌های بازگشت حداکثر بارش ۲۴ ساعته از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های بارش یک منطقه است که در برآورد سیلاب‌ها نقش اساسی دارد. با روش‌های مختلف آماری، حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های واجد آماری استان گلستان برای دوره بازگشت‌های ۲ تا ۱۰۰ سال برآورد گردیده است. آن‌گونه که از جدول شماره ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین شدت بارش ۲۴ ساعته با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال در ایستگاه پس‌پشته (واقع در زیرحوضه چهل چای گرگانرود) به ترتیب با ۱۷۸، ۱۵۱، ۱۱۹، ۹۷، ۷۷ و ۵۵ میلی‌متر در شبانه‌روز و کم‌ترین مقادیر مربوط به ایستگاه تیل‌آباد (واقع در زیرحوضه تیل‌آباد گرگانرود) به ترتیب با ۲۴، ۳۱، ۳۵، ۳۸، ۴۳ و ۴۶ میلی‌متر در شبانه‌روز است. با عنایت به آنچه که به‌دست آمد، می‌توان بیان نمود که میزان حداکثر بارش ۲۴ ساعته در حوضه آبخیز گرگانرود از سمت غرب به شرق و از جنوب به شمال آن اغلب روندی نزولی داشته است. هرچند در بخش‌های ارتفاعات میانی این حوضه شاهد افزایش محسوسی در میزان حداکثر بارش ۲۴ ساعته می‌باشیم. همانطور که اشاره شد، شدت بارندگی در بخش‌های مختلف استان گلستان نشان می‌دهد که میزان بارندگی در زیرحوضه‌های واقع در حوضه آبخیز گرگانرود به‌مراتب بیشتر از دیگر حوضه‌های آبخیز این استان است. از این‌رو در ادامه به بررسی داده‌های بارندگی در ایستگاه‌های مختلف مستقر در این حوضه پرداخته می‌شود. پرباران‌ترین ناحیه واقع در حوضه آبخیز گرگانرود، در احاطه خط همباران ۱۰۰۰ میلی‌متری می‌باشد که این مرکز با یک کشیدگی شرقی - غربی، بخش محدودی از ارتفاعات منطقه را دربر گرفته است. همچنین کم‌باران‌ترین نواحی نیز در بخش جنوب‌شرقی قرار گرفته که میانگین درازمدت بارندگی سالانه در آن، به حدود ۲۰۰ میلی‌متر می‌رسد. همچنین، علاوه بر مقادیر کمینه و بیشینه میانگین درازمدت بارندگی سالانه بر اساس خطوط همباران منطقه، باید گفت که حداقل و حداکثر میزان بارندگی متوسط ماهانه در محدوده مطالعاتی، در ایستگاه‌های رباط‌قره‌بیل (زیرحوضه مادرسو) و شیرآباد (زیرحوضه رودبارمحمدآباد - زرین گل) به ترتیب برابر ۴/۸ (در شهر یورماه) و ۱۴۲/۳ میلی‌متر (در اسفندماه) گزارش شده است. همچنین، مجموع مقادیر حداقل و حداکثر بارش نیز از ۴/۴ در ایستگاه قزاقلی (واقع در شاخه اصلی گرگانرود - بخش شهرستان گنبد کاووس) تا ۲۷۴۵/۵ در ایستگاه رامیان (زیرحوضه قورچای، شهرستان آزادشهر) میلی‌متر در نوسان بوده است. در بررسی سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی معلوم گردید که تغییرات موجود از نوع روند و در دو جهت مثبت و منفی بوده است. با توجه به روند گرمایش جهانی رخ داده در جهان می‌توان افزایش روندهای مثبت در پارامترهای اقلیمی را توجیه کرد.

جدول ۵. میانگین بارش پیش‌بینی شده با دوره زمانی ۳۵ ساله ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵

Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	STATION
۴۰/۸	۶۹/۶	۶۲/۳	۸۷/۷	۵۵/۲	۵	۳۷/۷	۳۱	۵۶/۸	۷۲/۸	۱۱۳/۷	۵۴/۴	علی آباد کتول
۴۹/۸	۵۹/۹	۵۳/۳	۷۰/۳	۱۵/۹	۲۵/۷	۴۵	۲۰	۵۱/۸	۷۴/۶	۳۶/۳	۴۲/۸	بندرگز
۴۹/۹	۶۳	۶۵/۵	۳۷/۱	۱۶/۲	۲۶/۲	۳۷/۴	۱۲/۹	۲۸/۳	۴۹/۵	۵۳/۴	۵۲/۲	بندر ترکمن
۳۸/۱	۴۴/۸	۳۳/۹	۲۳/۵	۲۷/۳	۲۳/۶	۱۵/۸	۲۷/۵	۶۶/۳	۶۸/۴	۵۲/۷	۵۰/۶	گنبد کاووس
۳۸/۶	۶۸/۹	۴۳/۸	۳۳/۴	۱۸/۸	۱۴/۷	۲۳/۷	۲۵/۵	۴۰/۸	۴۱/۷	۳۶/۵	۵۹/۴	گرگان
۳۴/۸	۵۲/۶	۲۰/۳	۸۹/۵	۲۱/۵	۷/۸	۱۵/۳	۲۲/۶	۳۹/۱	۶۱/۷	۷۷/۶	۳۴/۲	هاشم آباد
۲۵/۱	۲۵/۹	۲۶/۳	۱۹	۷/۵	۱۱/۸	۱۲/۷	۸/۸	۱۷/۴	۲۹/۸	۴۶/۵	۳۴/۹	اینچه برون
۵۰/۸	۲۳/۶	۳۱/۲	۲۲/۹	۲۲/۶	۲۲/۳	۳۱/۹	۲۶/۴	۷۹/۹	۵۹/۸	۷۱/۶	۳۷/۴	کلاله
۲۶/۸	۴۹/۷	۵۰/۳	۱۸/۸	۱۱/۵	۲۱/۳	۲۱/۵	۲۶/۲	۴۵	۵۱/۶	۳۵	۳۶/۸	مراوه تپه
۵۳/۴	۶۴/۳	۶۴/۱	۲۵/۴	۵۹/۲	۳۹/۹	۳۲	۶۷/۷	۸۶	۱۳۵/۴	۱۰۶/۸	۹۵/۵	مینودشت



شکل ۴. نمودار بارش ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 برای سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۵

رژیم بارش منطقه مورد مطالعه مدیترانه‌ای بوده و بارش فصلی کاملاً متغیر است. ۳۸٪ بارش در زمستان، ۱۴/۶٪ در تابستان، ۲۲/۸٪ در پائیز و ۲۵/۵٪ در بهار رخ می‌دهد. بارش ماهانه منطقه مورد مطالعه شامل ۱۳/۵۳٪ در بهمن ماه (Feb) که مرطوبترین ماه سال است، در دی ماه ۱۱/۲۳٪، در اسفند ماه ۱۰/۶٪ و در آذرماه ۹/۳٪ می‌باشند. خشک‌ترین ماه سال مردادماه با ۵ درصد بارندگی سالانه است. متوسط حداکثر باران روزانه با دوره بازگشت ۱۰ ساله با تداوم یک ساعته ۳۷/۹ میلیمتر می‌باشد. نتایج حاصل برای سناریو SRA1B نشان داد که برای ماه می افزایش دبی ۲۱/۱۱ درصدی پیش‌بینی شده است. از سوی دیگر همین سناریو برای ماه اکتبر کاهش دبی ۱۳/۲ درصدی را پیش‌بینی کرده است. طبق سناریو SRA1B برای هر دو ماه می و اکتبر به ترتیب کاهش دبی ۲/۹ و ۳۸/۶۳ درصدی پیش‌بینی شده است. همچنین برای سناریو SRA1B برای ماه می افزایش دبی ۱۹/۳۴ درصدی و کاهش دبی ۲/۱۴ درصدی پیش‌بینی شده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به طور کل دوره آتی منطقه مورد مطالعه با کاهش متوسط دبی جریان مواجه خواهد بود. با تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده می‌توان استنباط کرد که پدیده تغییر اقلیم به مرور زمان اثرات خود را بر منطقه مطالعاتی محسوس خواهد کرد و در مقادیر پارامترهای دما و بارش تغییر ایجاد کرده و باعث کاهش بارش زمستانه و افزایش دمای منطقه مطالعاتی خواهد شد که این روند تغییر دما و بارش، تغییر در مقدار رواناب را به دنبال دارد. در واقع در طی این روند به تدریج با افزایش دما و کاهش بارش، ابتدا رواناب ماهانه و در نهایت رواناب سالانه دچار تغییرات قابل توجهی خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دبی آینده، حاکی از کاهش رواناب برای ماه اکتبر تحت سناریو SRA1B می‌باشد. بنابراین طبق نتایج به دست آمده می‌توان بیان داشت که به طور کلی سناریو SRA1B، کاهش دبی را برای دوره آتی نسبت به دبی مشاهداتی پیش‌بینی کرده است.

جدول ۶. معیارهای عملکرد مربوط به مرحله واسنجی مدل SWAT

NS	R2	R-Factor	P-Factor	مقادیر ارزیابی شده
۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۴۵	۰/۶۵	

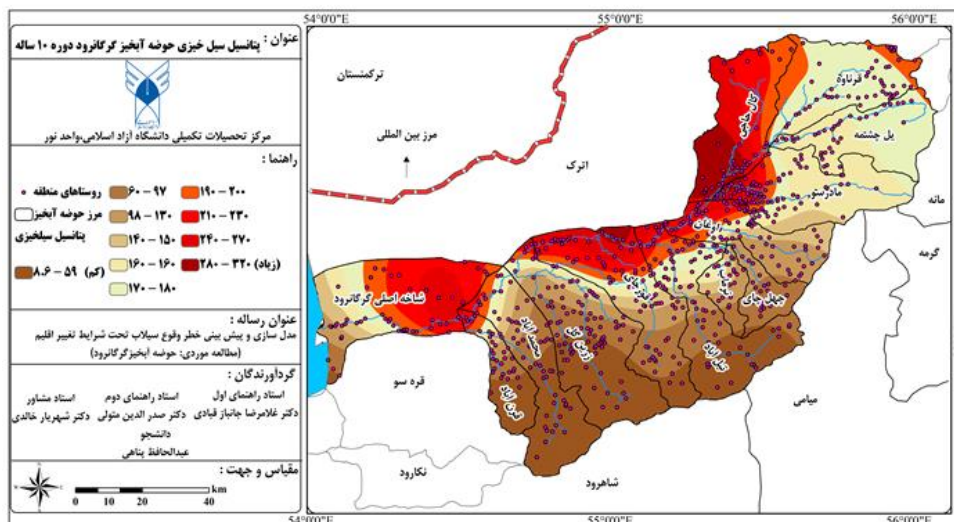
نتایج شبیه‌سازی دبی خروجی حوضه و دبی مشاهداتی اندازه‌گیری شده توسط معمار R2 و NS و همچنین پارامترهای عدم قطعیت r-factor و pfactor مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. مقادیر بهینه ضرایب R2 و NS، یک و یک، می‌باشد. همچنین اندازه عدم قطعیتی که محاسبه می‌شود، به وسیله pfactor کمی شده و درصد داده اندازه‌گیری شده برابر ۹۵ درصد احتمال عدم قطعیت پیش‌بینی توسط این معیار محاسبه گردید و بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای است که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند. اقدام دیگر کمی‌سازی آنالیز عدم قطعیت r-factor که میانگین ضخامت باند ۹۵ درصد احتمال عدم قطعیت پیش‌بینی تقسیم بر انحراف استاندارد داده اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌شود. به لحاظ تئوری f-factor و p-factor به ترتیب در بازه‌های ۰ تا ۱ و ۰ تا بی‌نهایت تغییر می‌کنند. pfactor برابر ۱ و r-factor برابر صفر نشان‌دهنده تطابق کامل مقادیر

پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی است ولی به دلیل عدم قطعیت‌های مختلف موثر بر نتایج خروجی، هیچگاه این ضرایب بهینه نمی‌باشند. یکی از اهدافی که مدل SWAT دنبال می‌کند، کاهش عدم قطعیت می‌باشد، به طوری که اکثر داده‌های مشاهداتی در سطح ۹۵ درصد قرار گیرند. در تحقیقات صورت گرفته، ضریب NS بیشتر از ۰/۵ و p-factor بیشتر از ۰/۵ را به عنوان مقادیر رضایت‌بخش معرفی کرده‌اند. نتایج جدول فوق نشان‌دهنده دقت بالای مدل در برآورد رواناب در دوره واسنجی می‌باشد.

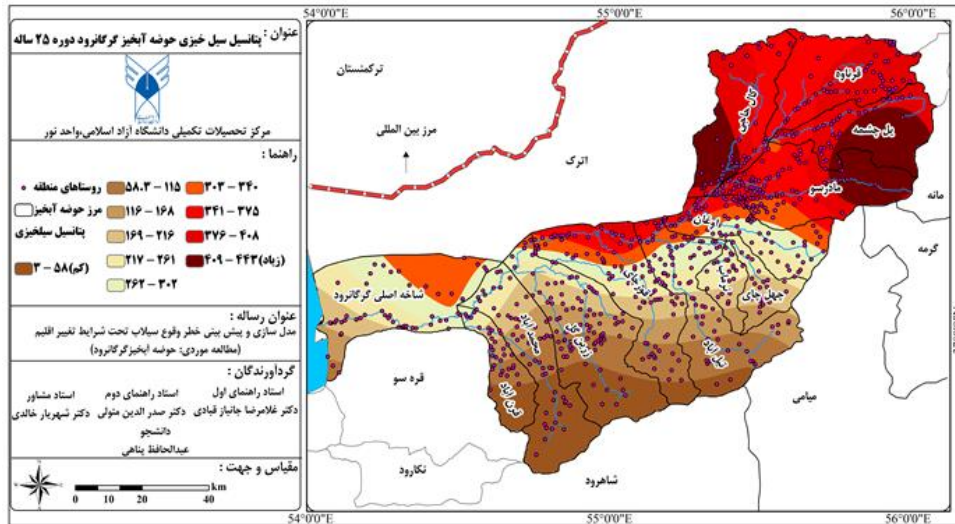
جدول ۷. درصد تغییرات میانگین ماهانه رواناب تحت سناریو انتشار در دوره مشاهداتی و آینده ۳۰ ساله ایستگاه

	DEC	NOV	OCT	SEP	AUG	JUL	JUN	MAY	APR	MAR	FEB	JAN
RCP2.6	۳۸/۸	۱۱/۵۲	۴۲/۳	۶/۲۹	-۱۸/۴۵	۱۳/۳	-۵۴/۰۳	-۴۹/۰۱	۶/۰۹	۵۴	۲۱/۰۲	۶/۰۱
RCP4.5	-۱۹/۰۸	۴۹/۷۳	۳۱/۱۳	۳۳/۲۸	۵۵/۰۱	۲۲/۱۹	-۲۱/۳۹	-۲۳/۵۳	۴/۰۲	۸/۰۳	۲۶/۷۸	۴/۰۳
RCP8.5	-۳۵/۰۴	۲۴/۴۱	-۳۴/۲	۲/۲۴	۶/۰۷	-۲۴/۴	-۶۶/۰۵	-۱۴/۰۲	۸/۰۶	۳۹/۱۱	۳/۹	۲۳/۷

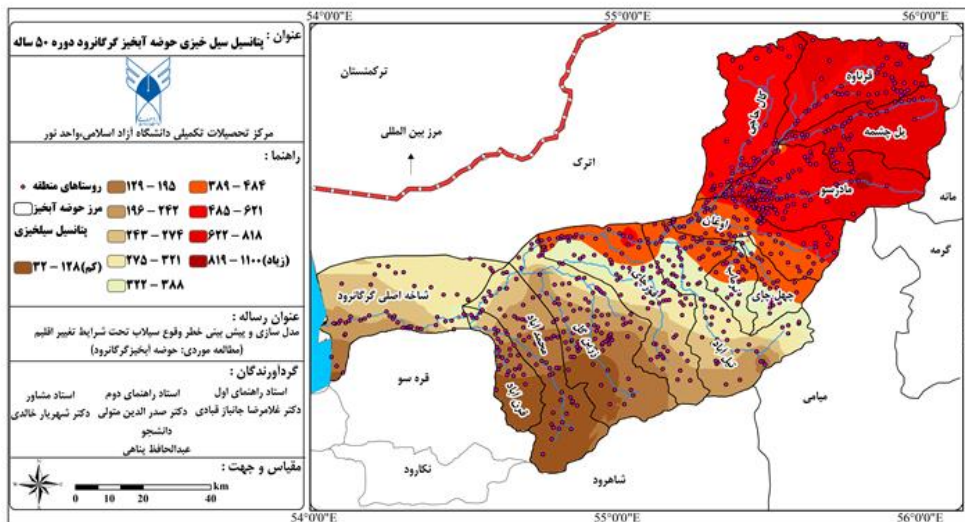
میزان کاهش رواناب در ماه‌های گرم سال و اوایل پاییز و اواخر بهار است. البته کاهش در فصل گرم، روند یکنواخت‌تری را دنبال می‌کند. در سناریوهای مختلف استثناهایی نیز وجود دارد. در اواخر زمستان و اوایل بهار افزایش دیده می‌شود. دلیل این افزایش به طور مستقیم با افزایش دما و افزایش بارش‌های جدی در دوره آبی مرتبط است. افزایش دما باعث افزایش ذوب برف در منطقه خواهد شد و به مرور زمان منابع آب موجود در ارتفاعات و مناطق سرد، ذوب شده که منجر به سیلاب در منطقه می‌گردد. بطور کلی افزایش بارش و رواناب‌های حدی دلیل بر پرآب شدن منطقه نمی‌باشد. علی‌رغم افزایش رواناب، دبی پایه کاهش و روزهای خشک به دلیل تبخیر بالا افزایش یافته است. از این رو افزایش رواناب نشان از افزایش وقایع حدی دارد که منجر به سیل در منطقه می‌گردد. با بررسی تغییرات انتظار می‌رود با افزایش سناریوها رواناب کاهش یابد که این روند در RCP4.5 با اینکه مقدار بارش حدی آن نیز افزایش داشته، کاهش یافته است و در RCP8.5 (با بارش حدی بیشتر) رواناب افزایش یافته است؛ دلیل این تغییر این است که رخداد بارش حدی در RCP4.5 در فصل تابستان و اوایل پاییز بوده است که با وجود تبخیر بالا و عدم ذوب برف (برخلاق RCP8.5 که در فصل بهار همزمان با ذوب برف) رواناب کمتر از سناریو بعدی شده اما بطور کلی روند افزایش رواناب نسبت به دوره پایه و کاهش آنها نسبت به RCP2.6 حفظ شده است. البته باید توجه داشت این افزایش رواناب بیانگر عدم خشکسالی منطقه نیست و مرتبط با دبی‌های حداکثر حوضه می‌باشد زیرا اکثر دبی‌های روزانه صفر در فصول گرم و خشک هستند و با وقایع و بارش‌های حدی افزایش می‌یابند؛ به عبارتی سال‌های خشک متمادی زیادی در این دوره ۳۰ ساله وجود دارد که در برخی از سال‌ها با افزایش شدت وقایع حدی دبی‌های حداکثری ایجاد می‌شود که گاهی با همراه شدن با ذوب برف در منطقه دبی‌های سیلابی زینباری را ایجاد می‌کند.



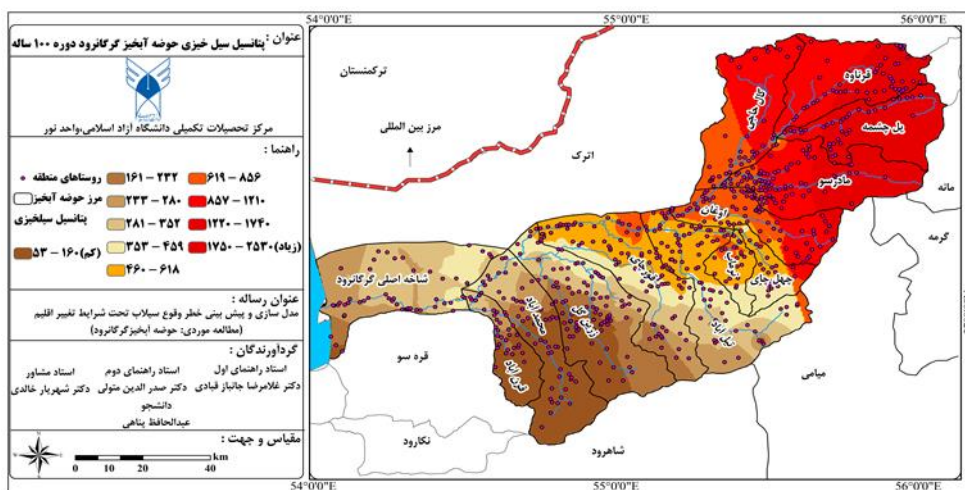
شکل ۵. پهنه‌بندی خطر سیلاب آینده با استفاده از خروجی روش SWAT دوره ۱۰ ساله



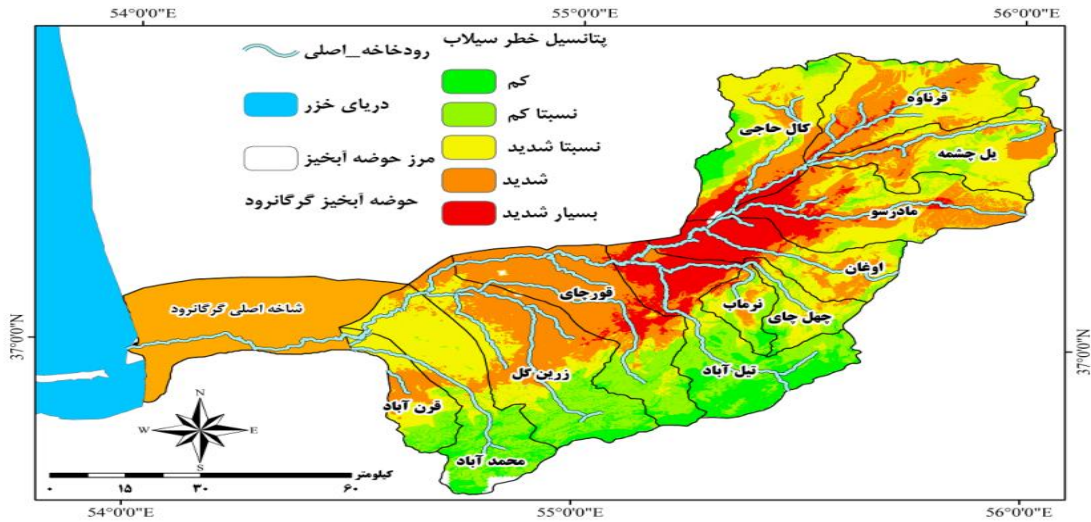
شکل ۶. پهنه‌بندی خطر سیلاب آینده با استفاده از خروجی روش SWAT دوره ۲۵ ساله



شکل ۷. پهنه‌بندی خطر سیلاب آینده با استفاده از خروجی روش SWAT دوره ۵۰ ساله



شکل ۸. پهنه‌بندی خطر سیلاب آینده با استفاده از خروجی روش SWAT دوره ۱۰۰ ساله



شکل ۹. پهنه‌بندی نهایی خطر سیلاب در حوضه آبخیز گرگانرود بر اساس روش AHP

با توجه به نقشه نهایی، ۱۵۴ روستا با جمعیتی معادل ۱۳۸۵۴۸ نفر در معرض خطر سیل خیزی با درجه بسیار بالا قرار دارند. بیشترین مساحت مربوط به طبقه با سیل‌خیزی نسبتاً شدید معادل ۲۷۲۵/۸۸ کیلومتر مربع، طبقه با پتانسیل بالا معادل ۲۶۰۷/۴۹ کیلومتر مربع، پتانسیل نسبتاً کم معادل ۱۶۵۴/۳۶ کیلومتر مربع، سیل‌خیزی با درجه بسیار بالا معادل ۹۰۱/۶۴ کیلومتر مربع و در نهایت طبقه با پتانسیل سیل‌خیزی کم معادل ۷۰۵/۲۹ کیلومتر مربع از سطح کل حوضه آبخیز گرگانرود را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که ۸۵ درصد سطح حوضه در معرض خطر سیلاب شدید واقع شده است.

جدول شماره ۸. وزن نهایی ارجعیت یک معیار به معیار دیگر بر طبق استاندارد روش سلسله‌مراتبی

بارش	انحنای زمین	ارتفاع	تراکم رودخانه	فرسایش	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	شیب	زمین‌شناسی	رواناب	رطوبت خاک	خاک‌شناسی	وزن معیار	درصد
۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۱۰	۱۰٪
۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۸٪
۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۰	۹٪
۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۱۱	۱۱٪
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۸٪
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۶	۶٪
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۷٪
۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۱	۱۱٪
۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۶٪
۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۰	۱۰٪
۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۶٪
۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۰	۹٪

۶. نتیجه‌گیری

در بخش شبیه‌سازی دبی بر اساس SWAT، نتایج حاصل برای سناریو SRA1B نشان داد که برای ماه می افزایش دبی ۲۱/۱۱ درصدی پیش‌بینی شده است. از سوی دیگر همین سناریو برای ماه اکتبر کاهش دبی ۱۳/۲ درصدی را پیش‌بینی کرده است. در بخش مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش تحت شرایط تغییر اقلیم، سناریوهای تغییر اقلیم دمای ماهانه از مدل HadCM3 برای ماه‌های مختلف سال نیز نشان‌دهنده بیشترین تغییرات دمایی در ماه‌های ژوئن، آگوست و فوریه می‌باشد که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن ماه‌های گرم سال و حتی گرم‌تر شدن ماه فوریه در دوره‌های آتی می‌باشد که این پدیده‌ها نیز بر روی زمان گل‌دهی گیاهان و ایجاد تنش آبی در فصول تابستان تأثیر خواهد گذاشت. مقایسه میانگین دماهای حداکثر (بیشینه) و حداقل (کمینه) در دوره پایه و شبیه‌سازی شده با مدل HadCM3 حوضه آبخیز گرگانود نیز نشان‌دهنده گرم‌تر شدن ماه‌های گرم سال و تایید موضوع مورد بحث را دارد. نتایج نشان می‌دهند که هم دمای حداکثر و هم دمای حداقل ایستگاه‌ها در دوره آینده افزایش خواهد یافت.

به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، درصد تغییرات بارش نیز برای حوضه آبخیز مورد نظر تهیه گردید که با مطالعه وضعیت میانگین درصد تغییرات بارش برای سناریوی SRA1B در ۲ دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۵ نیز نشان‌دهنده تغییرات بارش از ماه آگوست در دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۱ تا ۳۷/۵ درصد در ماه نوامبر همین دوره نسبت به دوره پایه را دارد. افزایش بسیار بالای تغییرات بارشی در ماه نوامبر نیز به جهت ایجاد سیلاب‌های پائیزه، قابل بررسی و تعمق می‌باشد. بیشترین افزایش بارش ماهانه شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 با رقم ۱۰۰ میلی‌متر برای سناریوی SRA1B در ماه نوامبر است؛ این رقم بیش از سه برابر بارش دور پایه در منطقه مطالعاتی می‌باشد که از لحاظ ایجاد سیلاب‌های مهیب و آمادگی، مقابله با حوادث احتمالی را می‌طلبد. روند افزایش و کاهش بارش در ماه‌های اکتبر و نوامبر و کاهش بارش در ماه‌های جولای و آگوست می‌باشد. در بخش پهنه‌بندی نهایی سیلاب با توجه به خروجی نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبخیز گرگانود، ۱۵۴ روستا با جمعیتی معادل ۱۳۸۵۴۸ نفر در معرض خطر سیل‌خیزی با درجه بسیار بالا قرار دارند. بیشترین مساحت مربوط به طبقه با سیل‌خیزی نسبتاً شدید معادل ۲۷۲۵/۸۸ کیلومتر مربع، طبقه با پتانسیل بالا معادل ۲۶۰۷/۴۹ کیلومتر مربع، پتانسیل نسبتاً کم معادل ۱۶۵۴/۳۶ کیلومتر مربع، سیل‌خیزی با درجه بسیار بالا معادل ۹۰۱/۶۴ کیلومتر مربع و در نهایت طبقه با پتانسیل سیل‌خیزی کم معادل ۷۰۵/۲۹ کیلومتر مربع از سطح کل حوضه آبخیز گرگانود را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که بیشتر سطح حوضه برابر ۸۵ درصد در معرض خطر سیلاب شدید واقع شده است.

بر اساس یافته‌های تحقیق می‌توان بیان نمود که در مجموع، بیشترین مقادیر دبی با دوره‌های مختلف بازگشت سیل (۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله)، مربوط به زیرحوضه مادر سو بوده و کمترین مقادیر این دبی نیز مربوط به زیرحوضه شاخه اصلی و سفلی گرگانود می‌باشد. به‌طور کلی افزایش بارش و رواناب‌های حدی دلیل بر پرآب شدن منطقه نمی‌باشد. علی‌رغم افزایش رواناب، دبی پایه، کاهش و روزهای خشک به‌دلیل تبخیر بالا افزایش یافته است؛ از این‌رو افزایش رواناب نشان از افزایش وقایع جدی دارد که منجر به سیل در منطقه می‌گردد. نتایج این تحقیق در خصوص استفاده از سناریوهای اقلیمی و مدل SWAT با نتایج گودرزی و فاتحی‌فر (۱۳۹۸) و نیز خوش‌روش و رضایی (۱۳۹۵)، در خصوص مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک تجزیه و تحلیل منطقه‌ای سیلاب با نتایج نفرزادگان و همکاران (۱۳۹۸)، در ارتباط با اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی با نتایج حری و دستورانی (۱۳۹۶) همخوانی دارد. کلیه مدل‌های اقلیمی دارای درصدی از خطا در شبیه‌سازی‌ها هستند که با روش‌های مختلف نظیر ریزمقیاس‌نمایی می‌توان این خطاها و عدم قطعیت ناشی از آنها را کاهش داد؛ لیکن در مورد آشکارسازی و نسبت‌دهی با توجه به اینکه شبیه‌سازی‌ها مربوط به اثرات جداگانه‌ای چون گازهای گلخانه‌ای، آئروسول و یا تغییرپذیری درونی اقلیم می‌باشند و داده‌های مشاهده‌ای مشابه یا معادلی برای آنها وجود ندارد، لذا ریزمقیاس‌نمایی یا تصحیح خطای موجود به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد مطالعات بعدی با لحاظ کردن اثر تغییر اقلیم بر اکولوژی حوزه آبخیز صورت گیرد که می‌تواند اطلاعات مناسب‌تری برای بررسی این آثار فراهم آورد. برای این کار نیاز به مطالعه دینامیک پوشش کاربری اراضی بر اثر تغییر اقلیم و آثار آن بر منابع آب منطقه‌ای داریم.

منابع

- بحری، معصومه و دستورانی، محمدتقی (۱۳۹۶). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری‌اراضی بر پاسخ هیدرولوژیک آبخیز اسکندری. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۶ (۲)، صص. ۳۷-۵۷.
- خوش‌روش، مجتبی؛ میرناصری، محمد و پسرکلو، مهسا (۱۳۹۶). آشکارسازی روند تغییرات بارش شمال کشور با استفاده از آزمون غیرپارامتری من-کندال. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۸ (۱۶)، صص. ۲۲۳-۲۳۱.
- زارعی، آذین؛ اسدی، اسماعیل؛ ابراهیمی، عطاله؛ جعفری، محمد و ملکیان، آرش (۱۳۹۷). بررسی تغییرات پارامترهای بارش و دما تحت سناریوهای اقلیمی در مراتع استان چهارمحال و بختیاری. *مرتع*، ۱۲ (۴)، صص. ۴۲۶-۴۳۶.
- عاقل‌پور، پویا و نادى، مهدی (۱۳۹۷). ارزیابی دقت مدل SARIMA در مدل‌سازی و پیش‌بینی بلندمدت میانگین دمای ماهانه در اقلیم‌های متفاوت ایران. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۳۹۷ (۳۵)، صص. ۱۱۳-۱۲۶.
- عابدینی، موسی و لطفی، خداداد (۱۳۹۸). برآورد ارتفاع رواناب جهت تحلیل پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از روش شماره منحنی در حوضه آبریز شاهرود اردبیل. *فضای جغرافیایی*، ۱۹ (۶۸)، صص. ۱۶۳-۱۸۱.
- عسگری، شمس‌اله؛ صفاری، امیر و فتحی، حجت‌الله (۱۳۹۷). بررسی سیل‌خیزی در حوضه آبریز جعفرآباد. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۸ (۵۰)، صص. ۷۷-۹۰.
- قاسمیان، هما و نجفی، اسماعیل (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در شهرستان کوهدشت با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی و فازی. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۲ (۳)، صص. ۴۰۳-۴۱۷.
- گودرزی، محمدرضا و فاتحی‌فر، آتیه (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP ۸.۵ با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (حوضه آذر شهر چای). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۹ (۵۳)، صص. ۹۹-۱۱۷.
- محمدی، حسین؛ امیری، ابراهیم و ربانی، فاطمه (۱۳۹۷). *تغییر اقلیم و مدل‌های اقلیمی*. تهران: موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.
- نفرزادگان، علیرضا؛ محمدی‌فر، علی‌اکبر؛ وقارفر، حسن و فروزان‌فرد، معصومه (۱۳۹۸). ادغام مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک تجزیه و تحلیل منطقه‌ای سیلاب جهت اولویت‌بندی زیرحوزه‌ها برای کنترل سیل (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دهبار خراسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸ (۲)، صص. ۲۷-۴۵.
- نگهبان، حبیب؛ رضایی‌مقدم، محمدحسن و نیکجو، محمدرضا (۱۳۹۷). پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز بالیقو چای اردبیل). تبریز.
- Cherie, N. Z. (2013). Downscaling and modeling the effects of climate change on hydrology and water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek Kassel) 2013.329.
- Feloni, E., Mousadis, I., And Baltas, E. (2020). Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach—The case of Attica region. *Journal of Flood Risk Management*, 13, pp. 1-15.
- Iqbal, M. S., Dahri, Z. H., Querner, E. P., Khan, A., And Hofstra, N. (2018). Impact of Climate Change on Flood Frequency and Intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*. 8 (4), pp. 114-130.
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A. M., Zhao, Wei. (2019). Flood-Risk Zoning Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Variable Set Theory. *Natural Hazards Review*, 20 (3).
- Kastridis, A., Kirkenidis, C., And Sapountzis, M. (2020). An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Hydrological Processes*. 34 (25), pp. 4920-4939.
- Kim, V., Tantanee, S., And Suparta, W. (2020). Gis-based flood hazard mapping using hec-ras model: a case study of lower mekong river, Cambodia. *Geographia technica*, 15 (1), pp. 16-26.
- Lu, Z., Zou, S., Xiao, H., Zheng, C., Yin, Z., Wang, W. (2015) Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 79, pp. 76-85.
- Mlinsky, D., Walega, A., Stachura, T., And Kaczor, G. (2019). A New Empirical Approach to Calculating Flood Frequency in Ungauged Catchments: A Case Study of the Upper Vistula Basin, Poland. *Water*, 11 (3), pp. 601-622.
- Yodying, A., Seejata, K., Chatsudarat, S., Chidburee, P., Mahavik, N., Kongmuang, C. H., And Tantanee, S. (2019). FD Flood Hazard assessment using Fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Bang Rakam model in Thailand. The 40th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2019) October 14-18, 2019 / Daejeon Convention Center (DCC), Daejeon, Korea.

References

- Abedini, M., Lotfi, K. (2018). Estimating the height of runoff to analyze flood potential using the curve number method in the Shahrood catchment area of Ardabil. *Geographical Space*, 19 (68), pp. 163-181. [In Persian]
- Aqilpour, P., Nadi, M. (2017). Evaluation of the accuracy of SARIMA model in modeling and long-term prediction of average monthly temperature in different climates of Iran. *Climatology Research*, 2017 (35), pp. 113-126. [In Persian]
- Asgari, S. h., Safari, A., And Fathi, H. (2017). Investigation of flooding in Jafarabad catchment area. *Applied Research Journal of Geographical Sciences*, 18 (50), pp. 77-90. [In Persian]
- Bahri, M., Dasturani, M. T. (2016). Evaluating the effects of climate change and land use change on the hydrological response of Eskandari watershed. *Geography and Environmental Hazards*, 6 (2), pp. 37-57. [In Persian]
- Cherie, N. Z. (2013). Downscaling and modeling the effects of climate change on hydrology and water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek Kassel)2013.329.
- Feloni, E., Mousadis, I., And Baltas, E. (2020). Flood vulnerability assessment using a GIS-based multi-criteria approach—The case of Attica region. *Journal of Flood Risk Management*, 13, pp. 1-15.
- Ghasemian, H., Najafi, I. (2018). Flood risk zoning in Kohdasht city using hierarchical and fuzzy analysis model. *Geography and Human Relations*, 2 (3), pp. 403-417. [In Persian]
- Gudarzi, M., Fatehifar, A. (2018). Distribution of flood risk due to climate change under RCP 8.5 scenario using SWAT hydrological model in Gis environment (Azar Shahr Chai Basin). *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 19 (53), pp. 99-117. [In Persian]
- Iqbal, M. S., Dahri, Z. H., Querner, E. P., Khan, A., And Hofstra, N. (2018). Impact of Climate Change on Flood Frequency and Intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*. 8 (4), pp. 114-130.
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A. M., Zhao, Wei. (2019). Flood-Risk Zoning Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Variable Set Theory. *Natural Hazards Review*, 20 (3).
- Kastridis, A., Kirkenidis, C., And Sapountzis, M. (2020). An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Hydrological Processes*. 34 (25), pp. 4920-4939.
- Khoshravesh, M., Mirnaseri, M., And Pesarkello, M. (2016). Revealing the trend of rainfall changes in the north of the country using the non-parametric Mann-Kendall test. *Watershed Management Research*, 8 (16), pp. 223-231. [In Persian]
- Kim, V., Tantanee, S., And Suparta, W. (2020). Gis-based flood hazard mapping using hec-ras model: a case study of lower mekong river, Cambodia. *Geographia technica*, 15 (1), pp. 16-26.
- Lu, Z., Zou, S., Xiao, H., Zheng, C., Yin, Z., Wang, W. (2015) Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 79, pp. 76-85.
- Mlinsky, D., Walega, A., Stachura, T., And Kaczor, G. (2019). A New Empirical Approach to Calculating Flood Frequency in Ungauged Catchments: A Case Study of the Upper Vistula Basin, Poland. *Water*, 11 (3), pp. 601-622.
- Mohammadi, H., Amiri, E., And Rabbani, F. (2017). *Climate change and climate models*. Tehran: University of Tehran Printing and Publishing Institute. [In Persian]
- Nafarzadegan, A., Mohammadifar, A. A., Waqarfard, H., And Forozanfard, M. (2018). Integration of multi-criteria decision making models and regional flood analysis technique to prioritize sub-basins for flood control (case study: Dehbar Khorasan watershed). *Geography and Environmental Hazards*, 8 (2), pp. 27-45. [In Persian]
- Negahban, H., Rezaei Moghadam, M. H., And Nikjo, M. R. (2017). Urban flood risk zoning using the HEC-HMS model (case study: Ardabil's Baliqlo Chai catchment). Tabriz. [In Persian]
- Yodying, A., Seejata, K., Chatsudarat, S., Chidburee, P., Mahavik, N., Kongmuang, C. H., And Tantanee, S. (2019). FD Flood Hazard assessment using Fuzzy analytic hierarchy process: A case studt of Bang Rakam model in Thailand. The 40th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2019) October 14-18, 2019 / Daejeon Convention Center (DCC), Daejeon, Korea.
- Zarei, A., Asadi, I., Ebrahimi, A., Jafari, M., And Malekian, A. (2017). Investigating the changes of precipitation and temperature parameters under climatic scenarios in the pastures of Chaharmahal and Bakhtiari provinces. *pasture*, 12 (4), pp. 426-436. [In Persian]

نحوه استناد به این مقاله:

پناهی، عبدالحافظ؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ متولی، صدرالدین و خالدی، شهریار (۱۴۰۲). سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). *مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی*، ۴ (۱۳)، صص. ۴۵-۶۱.
DOI: 10.22124/GSCAJ.2023.22411.1172

Copyrights:

Copyright for this article are retained by the author(s), with publication rights granted to *Geographical studies of Coastal Areas Journal*. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

