

Comprehensive Assessment of Flood Susceptibility in the Gorganroud Watershed Based on Influential Factors

Azam Najafi Vafa¹, Seiyed Mossa Hosseini^{2*} , Mansour Jafarbeglou², Mohammad Mehdi Hosseinzadeh³

1. PhD Student in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: smhosseini@ut.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-8711>

3. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Shahid Beheshti, Iran

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: 01 June 2024 Revised: 26 May 2025 Accepted: 06 June 2025 Published: 22 December 2025</p> <p>Keywords: Gorganroud Watershed, Geographic Information System (GIS), Sensitivity Analysis, Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve.</p>	<p>Floods, as integral components of the natural hydrological cycle, can lead to significant social disruptions and morphological alterations in riverine and floodplain environments. Understanding the contributing factors and their relative impacts on basin flood susceptibility is vital for sustainable water resource management and flood risk mitigation. This study presents a streamlined approach to assessing flood susceptibility in the Gorganrud River Basin by integrating a comprehensive set of influencing factors. These factors encompass climatic variables (mean daily and hourly precipitation, snow depth, and snowmelt water equivalent), topographic features (digital elevation model, slope, and aspect), geomorphological characteristics (distance to main rivers, soil texture, geology, proximity to faults, drainage density), land use/land cover, vegetation status, and anthropogenic interventions. Each of the 13 factors was standardized and equally weighted, followed by a weighted linear combination to generate the flood susceptibility map. Validation was conducted using the mean time series of peak discharge data from 26 hydrometric stations, employing Spearman's rank correlation and receiver operating characteristic (ROC) curve analyses. Sensitivity analysis involved sequentially omitting each factor to evaluate its influence on flood susceptibility outcomes. Findings indicate heightened flood potential in the southeastern, western, and northeastern sectors of the basin. The Spearman correlation coefficient and area under the ROC curve (AUC) for the 100-year return period across 15 hydrometric stations were 0.66 and 0.68, respectively. Sensitivity analysis identified hourly precipitation, snowmelt water equivalent, and elevation as the most influential factors. The proposed methodology offers a practical framework for identifying flood-prone areas within the Gorganroud Basin, facilitating prioritized management and watershed planning interventions.</p>

How to Cite: Najafi Vafa, A. , Hosseini, S. M. , Jafarbeglou, M. and Hosseinzadeh, M. M. (2025). Comprehensive Assessment of Flood Susceptibility in the Gorganroud Watershed Based on Influential Factors. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(46), 1-22.



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.48905.2049

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In recent decades, the increasing frequency of floods in Iran—particularly in the northern regions—has caused extensive damage to infrastructure, natural resources, and human settlements. While flood susceptibility is an inherent characteristic of certain areas, factors such as climate change, vegetation degradation, and improper land use have exacerbated the phenomenon. Under these conditions, accurate identification of flood-prone zones and analysis of contributing factors are essential for effective watershed management, damage mitigation, and sustainable regional development.

Due to its geographical location, significant precipitation, and unique topography, the Gorganroud Watershed is highly susceptible to recurring floods. This study aims to map flood susceptibility in the watershed using advanced spatial analysis techniques and a combination of environmental indicators to provide actionable insights for decision-makers and disaster risk managers.

DATA AND METHODOLOGY

To assess flood susceptibility in the Gorganroud Watershed, spatial and environmental datasets were collected and prepared. These included a Digital Elevation Model (DEM), slope and aspect maps, and distance to rivers, land use, vegetation cover, and mean annual precipitation. Data sources included the National Cartographic Center, Landsat 8 imagery, and meteorological station records. Spatial analyses were conducted using ArcGIS and SAGA software.

Thirteen influencing factors were standardized, assigned equal weights, and integrated using the Weighted Linear Combination (WLC) method. Model validation was carried out using historical flood records and field observations. The final flood hazard map was produced by overlaying the weighted layers. Sensitivity analysis revealed that slope, proximity to waterways, and precipitation were the most influential factors. Additionally, statistical analysis using SPSS examined the correlation between variables and flood occurrence. The final flood susceptibility map was classified into five risk categories: very low, low, moderate, high, and very high.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of the final flood susceptibility map showed that the southern and southeastern areas of the watershed—particularly the cities of Minoodasht, Kalaleh, Gonbad-e-Kavus, Aliabad, and Aq Qala—fall into high and very high-risk zones. Major contributing factors included low slope gradients, high population density, vegetation degradation, and intense seasonal rainfall.

The integration of spatial and statistical data proved effective in identifying vulnerable areas, with results consistent with historical flood events. This consistency validates the reliability of the applied model. Sensitivity analysis confirmed that hourly precipitation, snowmelt water equivalent, and elevation exerted the strongest influence on flood susceptibility. Therefore, the use of spatial modeling techniques, supported by field data, presents a powerful tool for flood risk management and developmental planning.

CONCLUSION

This study confirms the effectiveness of GIS- and remote sensing-based approaches for flood hazard analysis and watershed management. Accurate identification of flood-prone areas using spatial data and multi-criteria analysis not only enhances model accuracy but also enables targeted water resource management.

The results indicate that the southern and central regions of the Gorganroud Watershed are the most flood-prone and should be prioritized in development planning. Key mitigation strategies include preserving vegetation cover, revising land use patterns, and enhancing drainage capacity in vulnerable zones.

Implementing these findings can facilitate the design of proactive flood prevention programs and support comprehensive flood management. Future research is recommended to incorporate time-series datasets and apply machine learning algorithms to improve flood prediction and adaptive risk management.

REFERENCES

References [in Persian]

- Arkhi, S., & Yaribeygi, H. (2021). Flood hazard zoning using Geographic Information System. *Quantitative Geomorphology Research*, 10(3), 86–110. [In Persian]
- Esfandiari, A., & Ghaderi, F. (2024). Flood potential of the Rajaei Dam basin. *Journal of Civil Engineering*, 53(113), 100–111. [In Persian]
- Abedini, M., & Fathi-Jookdan, R. (2016). Flood hazard zoning in the Gorganrud basin. *Hydrogeomorphology*, 7, 3–30. [In Persian]
- Jalalian, M. (2022). Flood susceptibility mapping in the Gorganrud basin. *Spatial Geographic Planning*, 11(42), 143–162. [In Persian]
- Hosseinzadeh, M. M., Salehipour, A., & Rezaeian, F. (2023). Flood sensitivity of Nekarood sub-basins. *Hydrogeomorphology*, 10(34), 75–100. [In Persian]
- Ziaeean, P., & Bodaghejad, A. (2020). Identifying potential flood-spreading areas using RS/GIS. *Geographical Sciences Research*, 20(57), 1–24. [In Persian]
- Foumani, S., & Vazifedoust, M. (2019). The impact of land use change on flood susceptibility in the Gorganrud Basin. *16th Iranian Soil Congress*, 1–7. [In Persian]
- Saghafian, B., et al. (2006). The impact of land use change on flood susceptibility in the Golestan Dam area. [In Persian]
- Avand, M., & Moradi, H. (2021). Using machine learning models to predict flood susceptibility. *Journal of Hydrology*, 595, 125663.
- Management and Planning Organization of Iran. (2001). *Flood control guideline (Publication No. 242)*. [In Persian]
- Shahreza, A. S., & Asghari, A. (2009). *Water resources studies of Gorganrud Basin* (Vol. 3, 293 pages). [In Persian]

References [in English]

- Avand, M., & Moradi, H. (2021). Using machine learning models, remote sensing, and GIS to investigate the effects of changing climates and land uses on flood probability. *Journal of Hydrology*, 595, 125663.
- DEPC. (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, Official Journal of the European Union L 288(27) 8p. Accessed at <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:en:pdf>
- Duangyiwa, C., & Cheewinsiriwat, P. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Model: A Case Study of Chai Nat Province, Thailand. In *Applied Geography and Geoinformatics for Sustainable Development: Proceedings of ICGGS 2022* (pp. 1-17). Cham: Springer International Publishing.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 118-133.
- UNISDR (2009). United Nations International Strategy for Disaster Reduction – Terminology on Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland
- DEPC (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, Official Journal of the European Union L 288(27) 8p. Accessed at <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:en:pdf>
- Kazakis, N., Kougiyas, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۶، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۴

ارزیابی جامع پتانسیل سیل خیزی حوضه آبریز گرگانرود براساس فاکتورهای مؤثر

اعظم نجفی وفا^۱، سید موسی حسینی^{۲*} , منصور جعفر بگلو^۲، محمد مهدی حسین زاده^۳

۱. دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: smhosseini@ut.ac.ir / <https://orcid.org/0000-0001-7161-8711> / ORCID:

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سیلاب‌ها به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از چرخه طبیعی هیدرولوژیکی، می‌توانند منجر به اختلالات اجتماعی قابل توجه و تغییرات مورفولوژیکی در محیط‌های رودخانه‌ای و دشت‌های سیلابی شوند. درک عوامل مؤثر و تأثیر نسبی آن‌ها بر حساسیت حوضه به سیلاب، برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خطر سیلاب حیاتی است. این مطالعه رویکردی ساده‌شده برای ارزیابی حساسیت به سیلاب در حوضه رودخانه گرگانرود ارائه می‌دهد که با ادغام مجموعه‌ای جامع از عوامل مؤثر انجام شده است. این عوامل شامل متغیرهای اقلیمی (میانگین بارش روزانه و ساعتی، عمق برف و معادل آبی ذوب برف)، ویژگی‌های توپوگرافی (مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب)، خصوصیت‌های ژئومورفولوژیکی (فاصله تا رودخانه‌های اصلی، بافت خاک، زمین‌شناسی، نزدیکی به گسل‌ها، تراکم زهکشی)، کاربری اراضی/پوشش زمین، وضعیت پوشش گیاهی و مداخلات انسانی می‌باشند. هر یک از ۱۳ عامل استانداردسازی شده و وزن‌دهی مساوی دریافت کردند، سپس با استفاده از ترکیب خطی وزنی، نقشه حساسیت به سیلاب تولید شد. اعتبارسنجی با استفاده از میانگین سری زمانی داده‌های اوج دبی از ۲۶ ایستگاه هیدرومتری، با بهره‌گیری از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن و تحلیل منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) انجام شد. تحلیل حساسیت با حذف متوالی هر عامل برای ارزیابی تأثیر آن بر نتایج حساسیت به سیلاب صورت گرفت. یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر سیلاب در بخش‌های جنوب شرقی، غربی و شمال شرقی حوضه هستند. ضریب همبستگی اسپیرمن و مساحت زیر منحنی ROC، برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در ۱۵ ایستگاه هیدرومتری به ترتیب ۰٫۶۶ و ۰٫۶۸ بود. تحلیل حساسیت نشان داد که بارش ساعتی، معادل آبی ذوب برف و ارتفاع به‌عنوان مؤثرترین عوامل شناسایی شدند. روش پیشنهادی، چارچوبی عملی برای شناسایی مناطق مستعد سیلاب در حوضه گرگانرود ارائه می‌دهد که تسهیل‌کننده اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی و برنامه‌ریزی حوضه آبریز است.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: پتانسیل سیل خیزی، حوضه آبریز گرگانرود، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل حساسیت، نمودار مشخصه عملکرد.</p>

استناد: نجفی وفا، اعظم، حسینی، سید موسی، جعفر بگلو، منصور و حسین زاده، محمد مهدی. (۱۴۰۴). ارزیابی جامع پتانسیل سیل خیزی

حوضه آبریز گرگانرود براساس فاکتورهای مؤثر. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۴(۴۶)، ۱-۲۲.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.48905.2049



مقدمه

سیلاب به‌عنوان بخشی از چرخه‌ی هیدرولوژیکی طبیعی با پتانسیل تخریبی بالا، می‌تواند آسیب‌های اجتماعی و تغییرات محیط زیست عمده‌ای را در رودخانه و سیلاب‌دشت به‌همراه داشته باشد. علاوه بر این، برخی فعالیت‌های انسانی می‌توانند احتمال وقوع سیل و اثرات منفی آن را افزایش دهند. این اثرات ممکن است به محدودیت در حفظ محیط زیست و تغییرات در حوضه‌های آبریز منجر شوند. اقدامات ناپایدار و بی‌توجهی در این زمینه معمولاً موجب افزایش خسارت‌های اقتصادی می‌شود. بنابراین، ممکن است ما به‌صورت داوطلبانه یا به‌دلیل فشار اجتماعی در معرض خطر سیل قرار بگیریم. در دهه‌های اخیر، افزایش فراوانی و شدت سیل‌ها به‌دلیل تغییرات آب‌وهوایی و تغییرات در کاربری زمین ثبت شده است (مارکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ کورگیلاس^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ استوکر^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). تغییرات آب‌وهوایی به یکی از جدی‌ترین تهدیدهای پیش روی کره زمین تبدیل شده است. گرم شدن کره زمین و مشکلات متعاقب آن خشکسالی، بیابان‌زایی و سیل، شاید برجسته‌ترین شکل این تغییر باشد که تمامی قاره‌های جهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد (دوانگیوا و همکاران، ۲۰۲۳). سیلاب حاصل از ذوب برف نقش مهمی در مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق سردسیر ایفا می‌کند و کلید کاهش خطرات سیل محسوب می‌شود. با توجه به افزایش پیوسته خسارت‌های ناشی از سیل در دهه‌های اخیر، ارزیابی خطر سیل در مقیاس‌های مکانی مختلف اهمیت بیشتری پیدا کرده است. این ارزیابی هم به تحلیل خطر و هم به بررسی آسیب‌پذیری می‌پردازد؛ زیرا هر دو از اجزای اصلی خطر سیل به‌شمار می‌روند. (UNISDR, 2009^۵).

نقشه‌های پتانسیل سیل در شناسایی مناطق در معرض سیل اهمیت زیادی دارند. این نقشه‌ها نقاط مستعد سیل را نشان می‌دهند. تفسیر نقشه‌های پتانسیل سیل باید اطلاعاتی درباره وسعت مکانی، عمق و فراوانی سیل ارائه دهد. ویژگی‌های نقشه‌های پتانسیل سیل و رتبه‌بندی مناطق مستعد سیل به نیازهای کاربران نهایی بستگی دارد (مرز و همکاران، ۲۰۰۷). نقشه‌های پتانسیل سیل به‌عنوان یک ابزار مهم در محدود کردن میزان خسارت ناشی از خطرات سیل از طریق ارائه اطلاعات قبلی در مورد سیل و ویژگی‌های مختلف آن عمل می‌کند (حمزه، ۱۳۸۴). به‌طور کلی، هدف از ارزیابی پتانسیل سیل، تعیین مناطقی است که در آن خطر به‌طور غیرقابل‌قبولی بالا است و نیاز به اقدامات کاهش‌دهنده دارند. بنابراین، تحلیل و ارزیابی جامع خطر سیل بخشی اساسی از مفهوم مدیریت خطرپذیری است. دقت اطلاعات ارائه‌شده توسط نقشه‌های خطر سیل در کاهش سیل و مدیریت مرتبط با آن بسیار مهم است. اعتبارسنجی و بررسی قابلیت پیش‌بینی این نقشه‌ها از طریق اعتبارسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت ضروری است. عدم قطعیت‌های مرتبط با نقشه‌های خطر سیل باید در طول برنامه‌ریزی مورد توجه قرار گیرند (DEPC, 2007^۸).

در ایران نیز مانند دیگر مناطق سیل‌خیز جهان، شدت وقوع سیلاب‌ها و میزان خسارت‌های ناشی از آن در دهه‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۰). به‌عنوان مثال، در مرداد ۱۳۸۰ سیل ویرانگری در استان گلستان رخ داد که خسارت‌های جانی و مالی بسیاری به مردم منطقه وارد کرد.

1 Marchi

2 Kourgialas

3 Stocker

4 Duangyiwa

5 United Nations International Strategy for Disaster Reduction

6 Merz

7 Hamzah

8 Directive European Parliament and of the Council

کارشناسان بارش باران و ازبین‌رفتن مراتع در استان‌های دیگر را به‌عنوان علل وقوع سیل معرفی کردند. در پی این حادثه ناگوار، ۲۵ روستای شهرستان کلاله در محاصره سیل قرار گرفت و بیش از ۱۵ هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی تخریب شد. در اسفند ۱۳۹۷، به‌دلیل بارندگی‌های شدید، سدهای بوستان و گلستان در شرق استان گلستان سرریز کردند و رودخانه‌های چهل‌چای و گرگانرود در اطراف گنبدکاووس طغیان کردند. تحقیقات نشان می‌دهد که سیلاب‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۸ به‌دلیل شدت و مدت زمان طولانی بارش به وقوع پیوسته است. مناطقی مانند آق‌قلا، گمیشان، بندرترکمن، گنبدکاووس و دیگر نقاط که در مسیر رودخانه‌های گرگانرود، قره‌سو و چهل‌چای قرار داشتند، از طغیان این رودها خسارت دیدند. حوضه آبریز گرگانرود در استان گلستان با مساحتی بیش از ۱۱۰۰۰ کیلومتر مربع از مناطق سیل‌خیز کشور است که به‌دلیل سیلاب‌های متعدد و هدر رفتن منابع آب و خاک به یکی از حوضه‌های آبریز بحرانی تبدیل شده و با مشکل کمبود اطلاعات و داده‌های هیدرومتری مواجه است (گزارش سیلاب‌های استان گلستان ۱۳۹۷-۱۳۹۸). در مطالعه‌ای که حسین زاده و همکاران (۱۴۰۱) در زیرحوضه‌های حوضه نکارود مازندران، با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، نشان دادند که حساسیت سیلاب در زیرحوضه‌های رودخانه نکا متفاوت می‌باشد. از میان عوامل محیطی موثر در مبحث سیل‌خیزی، عوامل ارتفاع و تراکم آبراهه تأثیرگذارترین عوامل در خطر رخداد سیلاب بوده‌اند. جلالیان (۱۴۰۰)، با استفاده از مدل تحلیل شبکه به ارزیابی پهنه‌بندی سیل‌خیزی در مقیاس زمانی و مکانی حوضه آبخیز گرگان رود پرداخت. در این پژوهش بعد از شناسایی عوامل تأثیرگذار بر وقوع سیل در منطقه، (شیب، ارتفاع، نفوذپذیری، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، پتانسیل تولید رواناب، شماره منحنی، فاصله از جریان، کاربری اراضی و پوشش گیاهی) وزن‌دهی و مقایسه دودویی بر اساس نظر کارشناسان و با استفاده از مدل تحلیل شبکه صورت گرفته است. نتایج پژوهش نشان داد که کلاس ۱ و ۲ (خطرپذیری بسیار زیاد و زیاد) در شرق، شمال شرق و جنوب شرق منطقه قرار دارد که ۲۰٪ مساحت منطقه را در بر می‌گیرد. نتایج این پژوهش برای شناسایی مناطق با احتمال بالای وقوع سیل در حوضه آبخیز گرگانرود آماده شده است. اسفندیاری و قادری (۱۴۰۲)، براساس GIS و رویکرد سنجش‌ازدور به تجزیه‌وتحلیل پتانسیل سیل‌خیزی و تولید رواناب حوضه آبخیز سد شهید رجایی ساری پرداختند. نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که در سطح اطمینان ۹۹ درصد ارتباط بین پتانسیل سیل‌خیزی منطقه با فاکتور فرسایش خاک از نظر آماری مستقیم و معنادار است.

فومنی و وظیفه دوست (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر سیل‌خیزی حوضه آبریز گرگانرود با فن سنجش‌ازدور نشان دادند که گرچه عامل اقلیم با حجم بارش ۲۰۰ میلی‌متر نقش مستقیمی در ایجاد رواناب و سیل حوضه‌ی آبریز گرگانرود داشته است؛ اما عامل تغییرات کاربری اراضی به‌علت گسترش فعالیت‌های انسانی موجب تغییرات بسیاری در پوشش منطقه شده است و به نظر می‌رسد عامل انسانی مقدم بر عامل اقلیم در سیل‌خیزی حوضه باشد. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با استفاده از Arc GIS به پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز گرگانرود پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که حوضه مورد مطالعه به‌دلیل برخورداری از متوسط بارندگی سالانه ۱۰۵۸٫۷ میلی‌متر، شیب زیاد، سازندهای نسبتاً نفوذپذیر و همچنین داشتن شکلی دایره‌وار از قابلیت سیل‌خیزی نسبتاً زیادی برخوردار می‌باشد. آرخی و همکاران (۱۴۰۰) به پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوضه گرگانرود پرداختند و آن‌ها نشان دادند در بین عوامل طبیعی، بارش بیشترین تأثیر در سیل‌خیزی حوضه دارد.

با توجه به مطالب بالا و کمبود اطلاعات و داده‌های با کیفیت در بیشتر حوضه‌های آبریز کشور، ارائه یک سیستماتیک تحلیلی برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی در سطح حوضه‌های آبریز ضروری است. از آنجا که خصوصیت‌های فیزیوگرافی، ژئومتری و اقلیمی حوضه آبریز تأثیر بسزایی در سیل‌خیزی و رفتار هیدرولوژیکی دارد، در این پژوهش تلاش می‌شود تا خلاء پژوهش‌های قبلی در شناسایی مناطق با پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبریز گرگانرود پر شود. همچنین، فاکتورهای مؤثری که تاکنون در سطح حوضه و زیرحوضه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌اند، به‌صورت جامع بررسی خواهند شد. در این مقاله، تمرکز اصلی بر تفاوت در رویکرد مدل‌سازی و تحلیل داده‌ها، استفاده از داده‌های هیدرومتری برای اعتبارسنجی و ارزیابی مدل، روش تحلیل حساسیت در مدل‌های پیچیده، نتایج کاربردی و نتیجه‌گیری‌های علمی و افزودن ابعاد نوآورانه در نتایج و یافته‌ها است که باعث می‌شود نوآوری و ارزش افزوده قابل-توجهی به آن داده شود. این بررسی منجر به تعیین شاخص پتانسیل سیل‌خیزی و درجه حساسیت لایه‌های ورودی می‌شود.

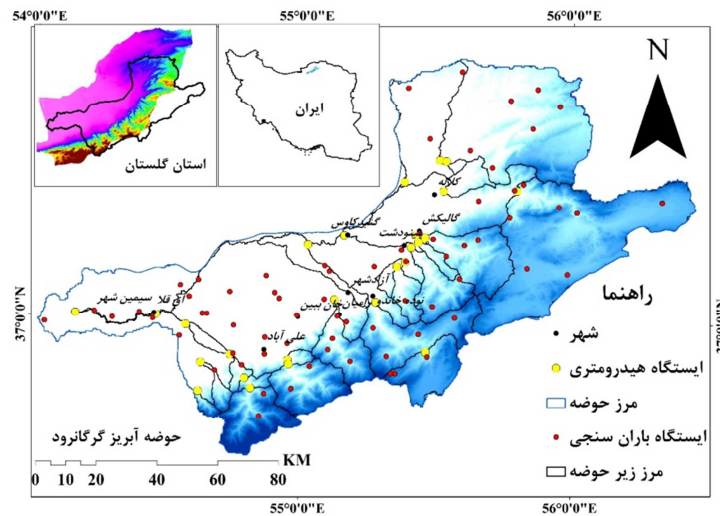
داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز رودخانه گرگانرود، واقع در استان گلستان (شکل ۱)، با بخش‌های بالایی (کوهستانی) و میانی (تپه‌ای) همپوشانی دارد. حوضه آبریز گرگانرود، با مساحتی برابر با ۱۰۱۹۷ کیلومتر مربع، یکی از حوضه‌های شمال شرق کشور محسوب می‌شود که بخش گسترده‌ای از آن در استان گلستان واقع است. بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه با کوه‌های 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 همپوشانی دارد (شهرضا و همکاران، ۱۳۸۸). این منطقه توسط یک شبکه رودخانه غنی که مهم‌ترین آن‌ها از غرب به شرق عبارتند از: رودخانه قرن‌آباد، رودخانه تقی‌آباد، رودخانه محمدآباد، کبودال، رامیان، قره‌چای، نرماب، قلی‌تپه، گالیکش، تنگراه، زاو، قره‌ناوه، ساری‌سو (شهرضا و همکاران، ۱۳۸۸)، خصوصیت‌های خود را نشان می‌دهد.

فرکانس بالایی از مناطق همگرایی هیدروگرافی، به‌خصوص در فرورفتگی‌ها وجود دارد که به انباشت آب و در نتیجه سیلاب شدن زمین کمک می‌کند. نرخ جریان از یک رودخانه به رودخانه دیگر بسته به اندازه حوضه و عوامل کنترل جریان متفاوت است (زهاریا و همکاران، ۲۰۱۷). میانگین دبی سالانه رودخانه گرگانرود در ایستگاه تمر - گرگان ۱۲ متر مکعب بر ثانیه است که باعث افزایش ۱۲ درصدی آب‌دهی رودخانه گرگانرود نسبت به داده‌های درازمدت شده است. رژیم هیدرولوژیکی این رودخانه‌ها با دبی زیاد و سیلاب‌های ناگهانی در بهار (به‌دنبال بارندگی زیاد و ذوب برف) و دبی کم در پاییز و تابستان مشخص می‌شود. در حال حاضر سه سازه‌های هیدرولیکی تأثیرگذار بر جریان طبیعی رودخانه‌ها احداث شده که عبارتند از: سد وشمگیر بر رودخانه گرگانرود (حجم فعال ۴۲ میلیون متر مکعب)، سد بوستان (حجم ۳۷ میلیون متر مکعب) و سد گلستان (حجم فعال ۵۲ میلیون متر مکعب). این سدها بیشتر برای تامین آب سکونتگاه‌های پایین‌دست و همچنین به تنظیم جریان رودخانه و کنترل سیل کمک می‌کنند (زهاریا و همکاران، ۲۰۰۵). رژیم جریان رودخانه ارتباط نزدیکی با تغییرات آب‌وهوایی دارد. بیشترین و کمترین بارش ثبت‌شده به ترتیب ۱۱۴۴ و ۱۷۹ میلی‌متر و همچنین بیشترین و کمترین دمای ثبت‌شده ۴۸ و ۱۰/۴- درجه سانتی‌گراد می‌باشد که این اعداد بیانگر نوسان و تنوع اقلیمی منطقه می‌باشد. لایه برف نقش مهمی در تامین جریان رودخانه‌ها

در فصل بهار دارد و میانگین ضخامت ماهانه آن در مناطق کوهستانی به ۸۰ تا ۹۰ سانتی متر می‌رسد (ساندو^۱ و همکاران، ۲۰۰۸). این مقاله، از طریق روش پیشنهادی، امکان شناسایی مناطق با بیشترین پتانسیل برای وقوع سیل را فراهم می‌کند. دانستن این مناطق برای اجرای اقدامات کاهش خطر سیل در مقیاس منطقه‌ای و محلی ضروری است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه

داده‌ها و روش‌ها

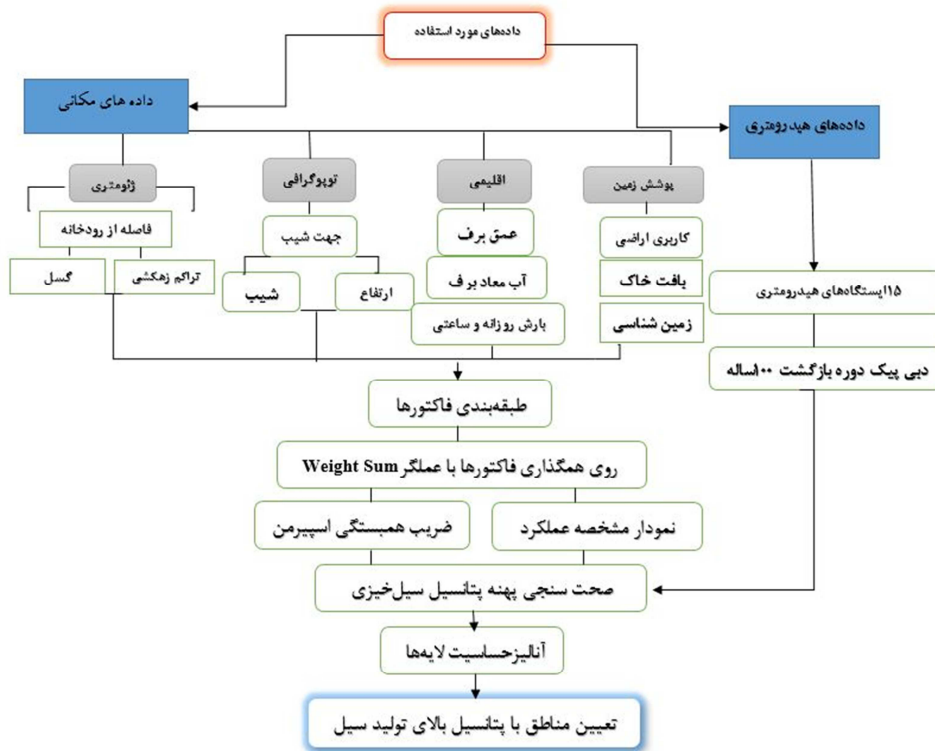
در این مقاله از دو نوع داده‌های مکانی و هیدرومتری مطابق با شکل ۲ استفاده شده است. داده‌های مکانی ۱۳ فاکتور شامل عوامل اقلیمی (متوسط بارش روزانه و ساعتی، عمق برف و آب معادل برف ذوب شده)، ویژگی‌های توپوگرافی حوضه (از جمله مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب) مشخصات ژئومتریک حوضه (فاصله از رودخانه‌های اصلی، فاصله از گسل، تراکم زهکشی)، ویژگی طبیعی حوضه (بافت خاک، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی) همچنین وضعیت کاربری اراضی و دخالت‌های انسانی منطقه مورد مطالعه است. این فاکتورها در شکل (۳) و در جدول (۱) نشان داده شده است. جزئیات بیشتر هر فاکتور نیز به اختصار توضیح داده شده است.

داده‌های هیدرومتری بیشتر شامل دبی پیک سالانه ثبت‌شده در ۱۵ ایستگاه هیدرومتری واقع در حوضه آبریز گرگانود در طی حداقل ۴۴ سال اخیر (۱۳۷۷-۱۳۹۲) است و برای تحلیل بزرگی سیلاب‌های ثبت‌شده در منطقه مورد مطالعه و صحت‌سنجی نقشه پتانسیل سیلاب تولیدشده استفاده می‌شود.

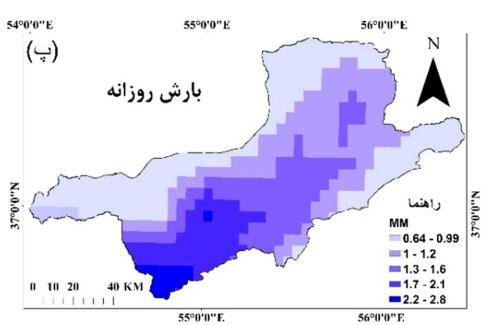
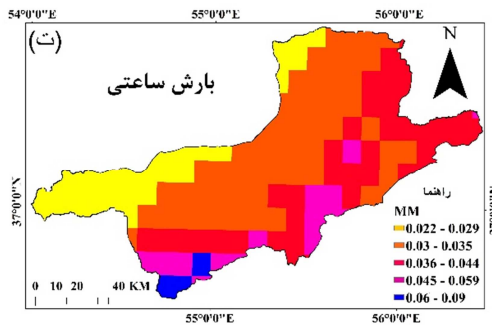
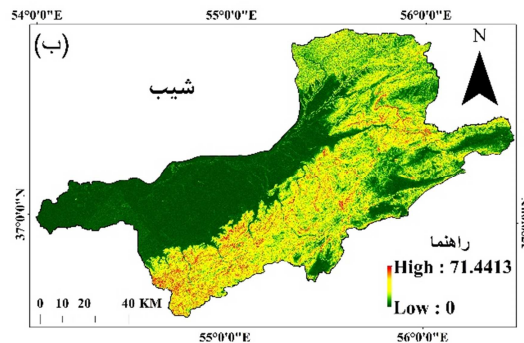
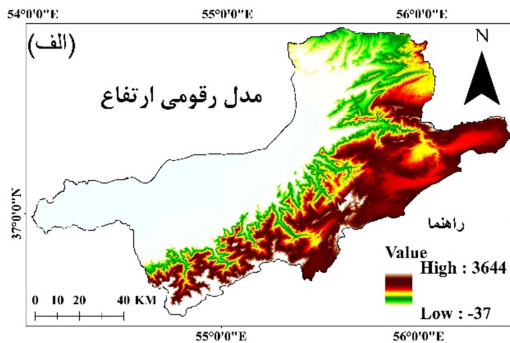
این داده‌ها شامل ۱۳ فاکتور می‌باشد که براساس مطالعات قبلی انتخاب و طبقه‌بندی شده‌اند. سپس برای اعتبارسنجی فاکتورها، از متوسط دبی حداکثر ویژه ۲۶ ایستگاه هیدرومتری (زیرحوضه‌ها) با استفاده نمودار مشخصه عملکرد و ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد و در نهایت با روی هم‌گذاری فاکتورها نقشه آنالیز حساسیت لایه‌های پتانسیل سیل خیزی تولید شد.

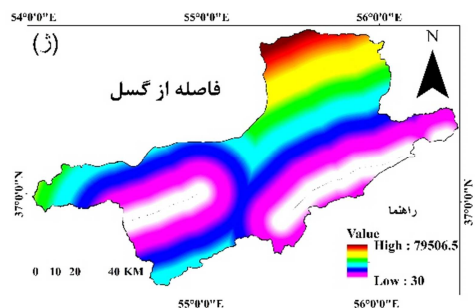
داده‌های به‌دست‌آمده، در محیط GIS با چندین برنامه نرم‌افزاری ArcGIS 10.8، Global Mapper 13، SAGA GIS، SPSS، Google Earth Engine پردازش شدند.

¹ Sandu



شکل ۲: روند نمای مراحل انجام پژوهش





شکل ۳: فاکتورها/نقشه‌های مورد استفاده در تهیه نقشه پتانسیل سیلاب در منطقه مورد مطالعه

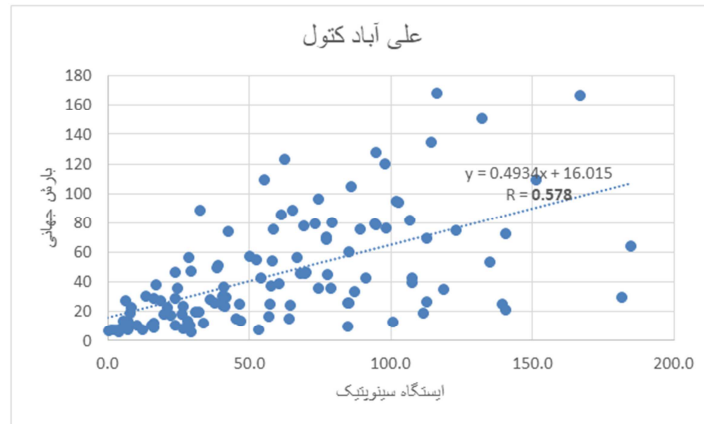
طبقات ارتفاعی (DEM): ارتفاع یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات خطر سیل است. مناطقی که ارتفاع کمتری دارند، نسبت به مناطق با ارتفاعات بیشتر، احتمال بیشتری برای تحت تأثیر قرارگرفتن بارندگی دارند و بیشتر در معرض سیل هستند (لی^۱ و همکاران ۲۰۱۴). با توجه به قرارگیری خروجی حوضه در اطراف دریای خزر و قرار داشتن این دریا در پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد، پست‌ترین منطقه ۲۶- و بلندترین منطقه دارای ارتفاع ۳۶۷۸ متر است که بیشترین ارتفاع در قسمت شرقی و جنوبی حوضه قرار دارد. این مطالعه از داده‌های DEM ماموریت توپوگرافی رادار شاتل (SRTM) با وضوح فضایی ~۳۰ متر استفاده کرد (شکل الف). این داده‌ها در سپتامبر ۲۰۱۴ منتشر شدند و در حال حاضر بهترین داده‌های ارتفاعی با دسترسی آزاد نسبت به مطالعه ما هستند.

شیب: شیب حوضه به دلیل ارتباط نزدیک با سرعت جریان‌های سطحی و مقدار نفوذ آب به داخل خاک، یکی از عوامل مهم در شناخت وضعیت هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد (آوما و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات گوناگون دسته‌بندی‌های مختلفی را برای نقشه شیب اتخاذ کرده‌اند. اما از آنجایی که گرگانود یک منطقه کوهستانی است، نقشه شیب بر اساس موقعیت و ویژگی‌های توپوگرافی آن دسته‌بندی شده است. بنابراین، شیب عامل مهمی در سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه محسوب می‌شود. عموم منطقه به‌خصوص در شمال حوضه دارای شیب کمتر از ۶ درجه بوده و بالاترین شیب (۷۲ درجه) منطقه در ارتفاعات و منطقه جنگلی قرار دارد. نقشه شیب ایجادشده با به‌کارگیری از داده‌های DEM (SRTM) و ابزارهای GIS در این مطالعه استفاده شد (شکل ب).

بارندگی: بارندگی یکی دیگر از پارامترهای مهم است که به‌طور گسترده در خطرات سیل و نقشه‌برداری حساسیت به‌کار گرفته شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). داده‌های بارش در این مطالعه از محصول SMap ماموریت اندازه‌گیری بارش جهانی (PM) استفاده شده است که مشاهدات جهانی بارش را در فواصل سه ساعته ارائه می‌کند. این داده‌ها با استفاده از میکروویو غیرفعال چندباندی و رادیومترهای فروسرخ از ماهواره GPM Core Observatory و به کمک مجموعه‌ای از ماهواره‌ها تخمین زده می‌شوند. الگوریتم بازیابی نرخ بارش GPM بر اساس مدل انتقال تابشی است و نرخ تنظیم‌شده توسط گیج، بر اساس بهینه‌سازی انباشت ۲۴ ساعته نرخ باران ساعتی GSMaP به بارش روزانه توسط اندازه‌گیری گیج NOAA/CPC محاسبه می‌شود. برای صحت‌سنجی داده‌های بارش جهانی، مقادیر به‌دست‌آمده از ایستگاه سینوپتیک علی‌آباد کتول در استان گلستان با داده‌های بارش GSMaP مقایسه شدند که ضریب همبستگی ۰.۵۷٪ بین داده‌ها محاسبه گردید. این نشان‌دهنده تطابق نسبتاً مناسب داده‌های ماهواره‌ای با مشاهدات ایستگاهی است.

¹ Li

² Ouma



شکل ۴: نمودار پراکنندگی بارش ماهانه ایستگاه علی آباد کتول با داده‌های سنجش‌زدوری GSMaP در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۸

بنابراین، داده‌های بارش جهانی GSMaP به‌عنوان یک ابزار مناسب برای مدل‌سازی خطرات سیل در این مطالعه انتخاب شدند. بارش در این مطالعه، از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۴، به‌صورت میانگین ۴۳ ساله برای هر پیکسل محاسبه شد. این داده‌ها برای بارش ساعتی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۴ و میانگین ۲۶ ساله بارش ساعتی برای هر پیکسل برآورد گردید. داده‌های بارش جهانی GSMaP با وضوح مکانی ۰٫۱*۰٫۱ درجه برای تهیه نقشه بارش بسیار دقیق استفاده شدند.

فاصله از رودخانه‌های اصلی: فاصله از رودخانه‌ها تأثیر قابل توجهی بر توزیع سیل دارد. به‌ویژه، شدت و وسعت سیل در مناطقی که نزدیک‌تر به رودخانه‌های اصلی قرار دارند، بیشتر است (گلن و همکاران، ۲۰۱۲). در این مطالعه، شبکه‌های جریان با استفاده از ابزار تجمع جریان (پوکر و همکاران، ۱۹۷۵) در نرم‌افزار ArcMap از داده‌های مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) ترسیم شدند (لو و همکاران، ۲۰۱۳). به منظور تحلیل تأثیر فاصله از رودخانه‌ها بر سیل خیزی، از روش فاصله ارزشی مرتبط با شیب (Cost Distance^۱) استفاده شد. در نهایت، یک شطرنجی با وضوح فضایی ۳۰ متر با استفاده از تحلیل بافر چندحلقه‌ای و اختصاص فاصله از رودخانه‌های اصلی به هر پیکسل تولید شد و این داده‌ها در ۵ کلاس مختلف طبقه‌بندی شد (شکل ۵).

کاربری زمین/پوشش زمین LC/LU: انواع مختلف پوشش زمین دارای نرخ‌های نفوذ و جریان واریزه‌ای متفاوتی هستند و بنابراین، نقشه LC/LU نقش اساسی در نقشه برداری خطر سیل دارد (کازاکیس^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

این نقشه با پردازش تصاویر سری زمانی از نقشه‌های سالانه پوشش زمین مادیس با تفکیک ۵۰۰ در بازه زمانی ۲۱ ساله از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در پلتفرم محاسبات ابری Google Earth Engine (GEE) تولید شده است. این نقشه LC/LU شامل ۱۷ کلاس LC شهری، آب، تالاب، باتلاق، استخر پرورش ماهی، بیشه‌زار و بوت‌ه‌زار، جنگل، سد و دریاچه، دشت بدون پوشش، جنگل دست کاشت، زارع آب‌ی و دیم و مرتع است. در این مطالعه، نقشه LC/LU با استفاده از معیارهای نشان‌داده‌شده دوباره طبقه‌بندی شد.

^۱ Cost Distance

^۲ Kazakis

برای نمونه، مناطق شهری با خطر بالای سیل مواجه هستند، درحالی که مناطق آبی خطر کمتری را در این زمینه تجربه می کنند (جها^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). در نهایت، این نقشه طبقه بندی مجدد (شکل ج) به عنوان یکی از ورودی های نقشه برداری خطر سیل استفاده شد.

بافت خاک: یکی از مهم ترین جنبه های خاک، بافت آن است که تأثیر قابل توجهی در بروز سیل دارد (اوما و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش انواع خاک داده های جهانی خاک استخراج شد. منطقه مورد مطالعه بیشتر شامل رخنمون های سنگی، رس، لومی، لومی - رسی و لایه جدید است (شکل چ). پارامتر بافت خاک اجازه می دهد تا میزان نفوذ آب در خاک را تعیین کند. به عنوان مثال، خاک حاوی رس ظرفیت نگهداری آب را حتی بیشتر از ریشه گیاهان افزایش می دهد (هارتمینک و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، خطر سیل در خاک های حاوی رس بسیار کم است. با این حال، نرخ نفوذ کم آب یکی از ویژگی های فیزیک و شیمیایی خاک های رسی (بدلندی) است. بنابراین، بیشتر بارندگی در مناطق دارای خاک رسی به رواناب سطحی تبدیل می شود. علاوه بر این، گزارش شده است که غلظت سدیم و کلر در نزدیکی سطح خاک های بدلند در طول فصل خشک اتفاق می افتد که نیروی دافعه ای بین ذرات خاک ایجاد می کند و باعث سخت شدن خاک می شود. اکوسیستم های بدلند همچنین با غلظت بالای سدیم و کلرید مشخص می شوند که رسانایی الکتریکی خاک را افزایش می دهد و آن را برای رشد گیاه نامناسب می کند و در نتیجه مناظر خالی ایجاد می کند. در مناطقی با این نوع خاک، یک دوره کوتاه بارندگی ممکن است به دلیل ناتوانی خاک در نفوذ آب و کمبود گیاهانی که آب را در خود نگه می دارند، باعث سیل شدید شود (شیو و همکاران، ۲۰۱۷). نقشه نوع خاک با استفاده از معیارهای گزارش شده، طبقه بندی شد. در نهایت، با توجه به نقشه بافت خاک، خاک های سطحی و کم عمق حوضه اغلب در شیب های تند گسترش دارند و در شیب های ملایم برتری با خاک های رسی و سیلتی به ضخامت زیاد است. از این خاک ها به عنوان یکی از ورودی های نقشه برداری خطر سیل استفاده شد.

جهت شیب: جهت شیب می تواند تأثیر زیادی در الگوی بارندگی و سیل خیزی منطقه داشته باشد. اهمیت این مؤلفه در ارتباط آن با جهت گیری پدیده های هواشناسی رایج، به ویژه جریان های هوای باران زا، نمایان می شود. با توجه به جهت غالب جریان های هوای باران زا از سمت غرب به شرق که از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه به سمت منطقه حرکت می کنند، دامنه های رو به غرب معمولاً بارش بیشتری دریافت کرده و پوشش گیاهی بیشتری نیز دارند. در نتیجه، این نواحی ممکن است خطر سیل خیزی کمتری داشته باشند. برای این مطالعه، جهت شیب به صورت نه گانه (شامل هشت جهت اصلی و چهار جهت میان بر) در نظر گرفته شد. نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر، در نرم افزار ArcMap و از طریق ابزارهای تحلیل فضایی تهیه گردید (شکل ح).

زمین شناسی: زمین شناسی به دلیل تأثیر بر میزان نفوذ پذیری و در نتیجه رواناب سطحی، به عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در نظر گرفته شد (آوند و همکاران، ۲۰۲۱). تنوع سازندهای سنگی در حوضه گرگانود بسیار بالا بوده که به حدود ۳۶ سازند می رسد. بنابراین، سازندهای ماقبل کواترنر تنها به لحاظ سنی دسته بندی شدند، اما تمامی سازندهای کواترنری به عنوان بستر اصلی وقوع سیلاب های مخرب، خصوصیت های متنوع مواد خود را حفظ نموده و در طبقه بندی ثانویه مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای به دست آوردن نقشه زمین شناسی منطقه، از نقشه زمین شناسی استان گلستان با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده گردید. لایه وکتوری نقشه یاد شده تهیه و در نهایت به فرمت رستری با

¹ Jha

اندازه پیکسل ۳۰ متر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تبدیل و سپس نقشه حاصل به چهل و هفت کلاس طبقه‌بندی شد (شکل خ).

برف: در حوضه‌های آبریز بزرگ و کوهستانی کشور مانند حوضه آبریز گرگانرود که رواناب‌ها به‌طور عمده به ذوب برف در فصل بهار وابسته هستند، از دیدگاه مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب، اهمیت زیادی دارد. مطالعه برف، عمق برف و رواناب حاصل از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (رحمانی و دانش‌یزدی، ۱۳۹۱). در این پژوهش، پوشش عمق برف که به‌طور میانگین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بر حسب متر برای هر پیکسل در نظر گرفته شد، بررسی شد. همچنین، آب معادل ذوب برف از دیتای FLDAS در سامانه گوگل‌ارث انجین استفاده شد (شکل د) که آب معادل برف و محاسبه میانگین آن در فصل زمستان، به‌صورت ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۴ که میانگین آن برای هر پیکسل بر حسب کیلوگرم بر متر مربع است، انجام گرفت (شکل ذ).

تراکم زهکشی: تراکم زهکشی نسبت طول آبراهه‌ها به مساحت حوضه آبخیز است. هر چه تراکم زهکشی‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد (نارمتا و همکاران، ۲۰۱۳). به‌عبارت‌دیگر، اعداد کم نشان‌دهنده مقاومت به فرسایش و یا نفوذپذیری مناسب هستند، درحالی‌که اعداد بالا نشان‌دهنده مقاومت ضعیف و نفوذپذیری کمتر حوضه و سیلاب بیشتر می‌باشند (شکل ز).

گسل‌های فعال: گسل‌های فعال در منطقه می‌توانند به ناپایداری عرصه‌های طبیعی مانند خاک منجر شوند. بنابراین، شناسایی این عوامل به‌عنوان یک پارامتر بسیار حیاتی اهمیت دارد (فیروزآبادی و همکاران، ۱۳۹۹). عملکرد گسل‌ها و درزها نقش اساسی در شکل‌گیری آبراهه‌ها، پرتگاه‌ها، دامنه‌ها و برون‌زد واحد سنگی دارد. بنابراین، گسل‌های اصلی در محدوده حوضه آبریز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که با تغییر شیب و کاهش نفوذپذیری، منطقه را در معرض شکل‌گیری رواناب قرار می‌دهند (شکل ژ).

جدول ۱: طبقه‌بندی فاکتورهای موثر در پتانسیل سیل خیزی حوضه آبریز گرگانرود (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۵)

فاکتورها	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
جهت شیب	۱٫۹ - ۲٫۵	۲٫۶ - ۲٫۸	۲٫۹ - ۳٫۱	۳٫۲ - ۳٫۵	۳٫۶ - ۴٫۳
بارش ساعتی	۱٫۹ - ۲٫۵	۲٫۶ - ۲٫۷	۲٫۸ - ۳٫۱	۳٫۲ - ۳٫۴	۳٫۵ - ۴٫۲
بافت خاک	۱٫۷ - ۲٫۴	۲٫۵ - ۲٫۷	۲٫۸ - ۳٫۱	۳٫۲ - ۳٫۵	۳٫۶ - ۴٫۶
ارتفاع	۱٫۸ - ۲٫۵	۲٫۶ - ۲٫۷	۲٫۸ - ۳	۳٫۱ - ۳٫۳	۳٫۴ - ۴٫۲
عمق برف	۲ - ۲٫۶	۲٫۷ - ۲٫۹	۳ - ۳٫۲	۳٫۳ - ۳٫۴	۳٫۵ - ۴٫۲
فاصله از گسل	۱٫۴ - ۲٫۳	۲٫۴ - ۲٫۶	۲٫۷ - ۲٫۹	۳ - ۳٫۲	۳٫۳ - ۴٫۴
زمین‌شناسی	۲٫۹ - ۴٫۱	۴٫۲ - ۵٫۲	۵٫۳ - ۶	۳٫۱ - ۳٫۱۱	۳٫۱۲ - ۴٫۲۶
کاربری اراضی	۱٫۸ - ۲٫۴	۲٫۵ - ۲٫۷	۲٫۸ - ۳٫۱	۳٫۲ - ۳٫۴	۳٫۵ - ۴٫۴
بارش روزانه	۲٫۰۲ - ۲٫۶	۲٫۶ - ۲٫۹	۲٫۹ - ۳٫۲	۳٫۳ - ۳٫۶	۳٫۶ - ۴٫۶
فاصله از رودخانه	۱٫۷ - ۲٫۳	۲٫۴ - ۲٫۶	۲٫۷ - ۳	۳٫۱ - ۳٫۳	۳٫۴ - ۴٫۳
شیب	۱٫۷ - ۲٫۳	۲٫۴ - ۲٫۶	۲٫۷ - ۳	۳٫۱ - ۳٫۴	۳٫۵ - ۴٫۴
تراکم زهکشی	۱٫۹ - ۲٫۵	۲٫۶ - ۲٫۸	۲٫۹ - ۳٫۱	۳٫۲ - ۳٫۵	۳٫۶ - ۴٫۴
آب معادل برف	۲ - ۲٫۶	۲٫۷ - ۲٫۹	۳ - ۳٫۲	۳٫۳ - ۳٫۴	۳٫۵ - ۴٫۲

معیارهای صحت‌سنجی نقشه پتانسیل سیل‌خیزی

برای ارزیابی اثربخشی آنالیز حساسیت لایه‌های پتانسیل سیل‌خیزی گرگانرود، از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) و ضریب همبستگی اسپیرمن برای تأیید صحت پیش‌بینی‌ها استفاده شد (شکل ۵). در این پژوهش برای ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت خطر وقوع سیل از منحنی مشخصه عملیاتی دریافت‌کننده یا منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. در منحنی ROC روی محور X مقدار تشخیص‌پذیری یا ویژگی (Specificity) نسبت پیکسل‌های بدون سیل که به درستی به‌عنوان بدون سیل طبقه‌بندی شده‌اند و روی محور Y مقدار حساسیت (Sensitivity) نسبت پیکسل‌های سیل که به درستی به‌عنوان سیل طبقه‌بندی شده‌اند، مشخص است. مقادیر Specificity و Sensitivity با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{Specificity} = \frac{\text{TN}}{\text{FP} + \text{TN}} \quad (1)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (2)$$

TN: تعداد مناطق بدون سیل که درست تشخیص داده شده‌اند؛ FP: تعداد نقاط سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند؛ TP: تعداد نقاط سیل که درست تشخیص داده شده‌اند و FN: تعداد نقاط بدون سیل که اشتباه تشخیص داده شده‌اند، است. برای نشان دادن عملکرد هر یک از مدل‌ها، از شاخص آماری صحت (Accuracy) نیز استفاده شد. این شاخص نسبت نقاط سیل‌گیر و بدون سیل را که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند، نشان می‌دهد.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (3)$$

تاکنون پژوهش قابل‌توجهی انجام نشده که بتواند راه حلی مناسب و نزدیک به ایده‌آل را مشخص کند که در آن گزینه‌های مختلف با توجه به تمامی معیارها ارزیابی شوند. روش آنالیز حساسیت به‌همراه رویکرد آماری برای ارزیابی و تعیین بهترین عملکرد همچنین مورد توجه قرار نگرفته است. (پورجوادی و شیرویه‌زاد، ۱۳۹۰). در این پژوهش، از آزمون آماری تحت عنوان ضریب همبستگی اسپیرمن تست (رابطه ۴) (اسمیت و کاجپرژیک^۲، ۲۰۱۱) استفاده شد.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

که در آن r_s ضریب اسپیرمن، n تعداد گزینه‌ها و d_i تفاضل رتبه مدل‌ها برای هر گزینه است.

تحلیل حساسیت فاکتورهای موثر در سیل‌خیزی

آنالیز حساسیت نقش اساسی در تحلیل‌های مربوط به سیلاب دارد و استفاده از آن برای تحلیل‌های کوتاه مدت و بلندمدت توصیه شده است. این آنالیز به‌عنوان یک دید کلی برای مطالعه نتایج مدل‌ها عمل می‌کند و این دید برای پیش‌بینی پتانسیل خطر یا کاهش خطر بسیار مهم است. آنالیز حساسیت می‌تواند در مقیاس جزئی یا کلی صورت گیرد. در مقیاس جزئی، تأثیر هر پارامتر به‌طور جداگانه با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها محاسبه می‌شود، درحالی‌که در مقیاس کلی، اجازه داده می‌شود که همه پارامترها در یک زمان تغییر کنند و عملکرد آن‌ها براساس انتخاب تصادفی پارامترها و روش‌های احتمالی مورد بررسی قرار گیرد. در این مرحله، برای تخمین تأثیرگذارترین فاکتور در

¹ PourJavad and Shirouyehzad

² Szmidi and Kacprzyk

سیل‌خیزی، فاکتورها بر اساس اهمیت‌شان در نرم‌افزار GIS دسته‌بندی می‌شوند و سپس تمام لایه‌ها با وزن یکسان با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در گام بعدی، با حذف یکایک فاکتورها، اثر این تغییرات بر برآورد سیلاب ثبت می‌شود، به‌طوری‌که تغییرات تمام فاکتورهای ورودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این‌رو، هدف از این مطالعه، بررسی حساسیت متغیرهای ورودی برای برآورد پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبریز گرگانود و تعیین فاکتورهای موثر بر دبی اوج سیلاب است.

نتایج و بحث

طبقه‌بندی فاکتورهای استفاده‌شده در پتانسیل سیل‌خیزی گرگانود

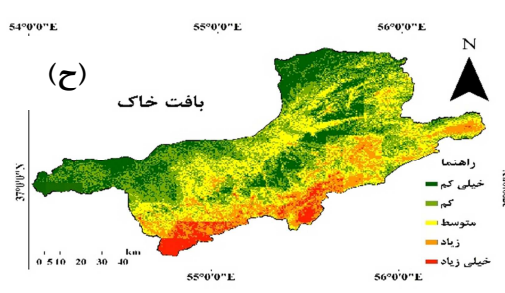
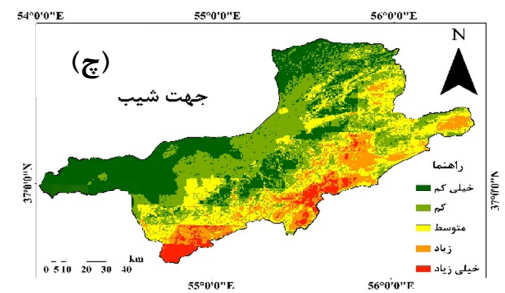
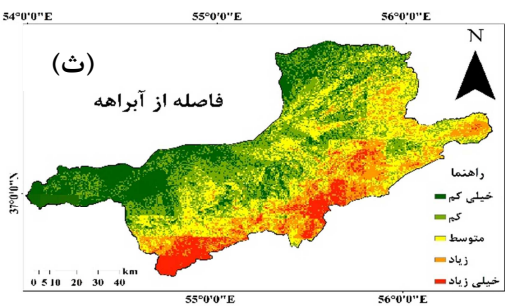
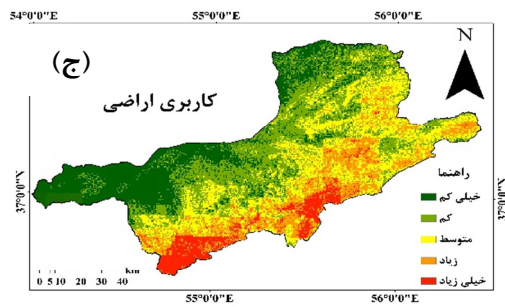
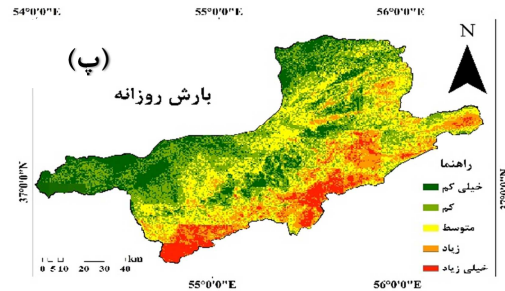
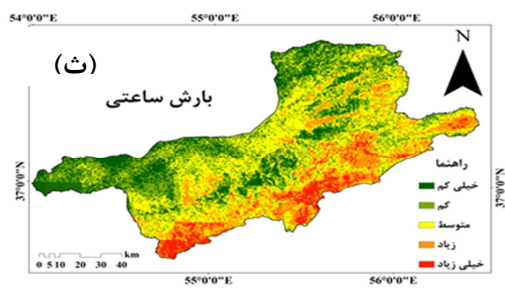
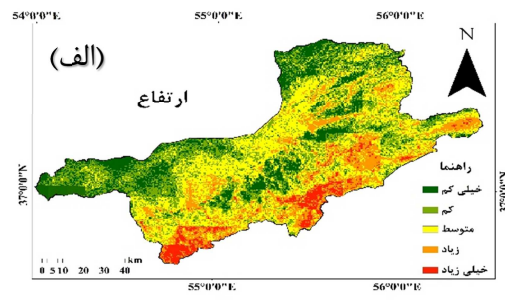
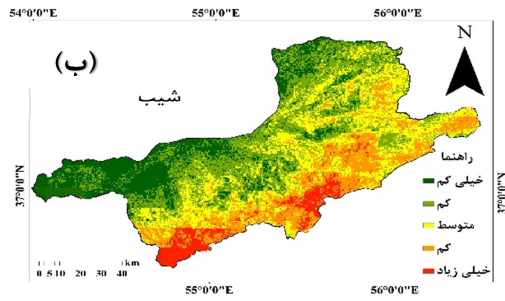
فاکتورهای ورودی تحلیل حساسیت لایه‌ها شامل طبقات ارتفاعی، درصد شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، تراکم زهکشی، بارندگی روزانه، بارندگی ساعتی، عمق برف، آب معادل برف، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، بافت خاک و کاربری اراضی را در شکل (۴) نمایش داده است. با تهیه لایه‌های اطلاعاتی هر یک از فاکتورها و تعیین مقادیر پیکسل‌های هر طبقه، به‌طور کلی جهت تعیین روابط بین متغیرها و همچنین تعیین اولویت تأثیر فاکتورها بر خروجی آنالیز حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. بی‌گمان با آگاهی از روابط داخلی فاکتورها، می‌توان ارتباط پارامترها را با یکدیگر درک کرد و حساسیت را در نقاط مختلف مشخص کرد و بدین ترتیب کاربرد به منظور بهره‌وری بیشتر از آن ارائه داد (کوشری^۱ و همکاران، ۲۰۱۰).

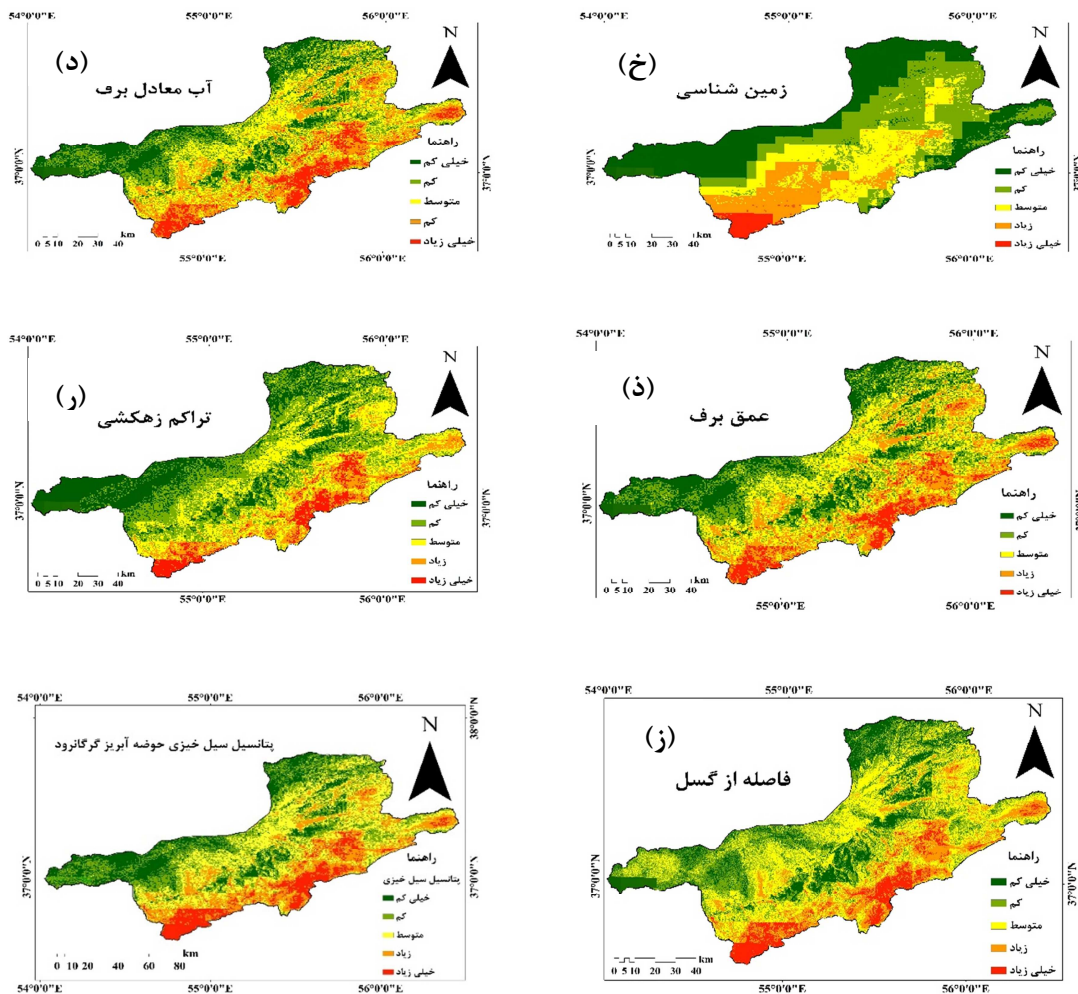
تهیه نقشه‌ی پتانسیل سیل‌خیزی

پس از اعمال وزن یکسان به هریک از طبقات، برای تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل از ابزار تحلیل رستری در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و با استفاده از توابع روی‌هم‌گذاری، نقشه حساسیت و احتمال سیل حوضه آبریز گرگانود با دستور شکست طبیعی در پنج کلاس طبقه‌بندی‌شده، به‌دست آمد. بر این اساس نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل سیل حوضه آبریز گرگانود ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است، بیشترین درصد مناطق سیل‌خیزی مربوط به طبقه متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. همچنین، شکل (۴) نقشه پتانسیل سیل‌خیزی را نشان می‌دهد و مناطق با شیب کم دارای بیشترین احتمال سیل‌خیزی می‌باشند. مناطق کوهستانی و مرتفع دارای کمترین احتمال وقوع سیل‌خیزی هستند.

پتانسیل سیل‌خیزی نشان می‌دهد که مناطق پایین‌دست حوضه که سطوح هموار و جلگه‌ای را شامل می‌شوند، مستعد خطر وقوع سیل هستند. دشت‌های سیلابی حاشیه رودخانه گرگانود پرخطرترین مناطق هستند که همیشه با طغیان گرگانود متحمل خسارت‌های مالی و جانی فراوان می‌شوند. شهرهای مهم منطقه نیز که اغلب در امتداد مسیر رودخانه‌های اصلی حوضه قرار دارند، در پهنه‌های با پتانسیل زیاد قرار گرفته‌اند که بیانگر آسیب‌پذیری این شهرها هنگام وقوع مخاطره سیلاب است. در مقابل، پهنه‌هایی که در طبقات کم و خیلی کم از نظر وقوع سیل قرار دارند، در مناطق شمالی و شمال‌غربی ارتفاعات بالا و مناطق دور از آبراهه‌ها را شامل می‌شوند که احتمال سیل‌خیزی این مناطق به هنگام وقوع سیل بسیار کمتر است.

¹ Kousari





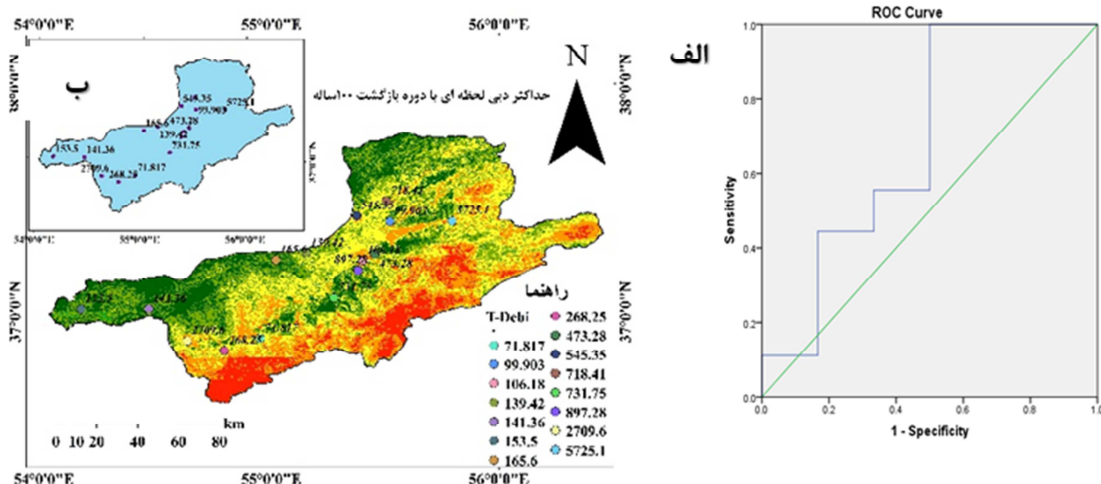
شکل ۴: نتایج رتبه‌بندی فاکتورهای موثر در ارزیابی پتانسیل سیل خیزی حوضه آبریز گرگانود و نقشه پتانسیل سیل خیزی حوضه آبریز گرگانود

ارزیابی صحت نقشه پتانسیل سیل خیزی

برای ارزیابی دقیق‌تر مدل در پاسخ به رخداد سیلاب‌های سال‌های ۱۳۷۷-۱۳۹۲، از داده‌های ۱۵ ایستگاه هیدرومتری استفاده شد. با به‌کارگیری نرم‌افزار Easyfit، دوره بازگشت ۱۰۰ ساله دبی‌های پیک محاسبه و این داده‌ها با نقشه پتانسیل سیل خیزی مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان‌دهنده ضریب همبستگی اسپیرمن برابر با ۰/۶۵ و نمودار مشخصه عملکرد (ROC) برابر با ۰/۶۸ برای این مقایسه بود که اعتبار مدل پیشنهادی را تایید می‌کند (شکل: ۵).

علاوه بر این، برای تحلیل و ارزیابی دوره‌های بازگشت دبی‌های پیک، از نمودار تحلیل فراوانی با استفاده از نرم‌افزار Easyfit بهره گرفته شد. این نرم‌افزار توانایی برازش توزیع‌های آماری مختلف به داده‌های مشاهده‌ای را دارد و به‌ویژه برای تحلیل دبی‌های پیک و محاسبه دوره‌های بازگشت بسیار مناسب است. در این تحلیل، ابتدا داده‌های دبی پیک روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری وارد نرم‌افزار شد و سپس توزیع‌های آماری مختلف برازش داده شد. بهترین توزیع با استفاده از آزمون‌های آماری و معیارهای ارزیابی مختلف، توزیع پیرسون انتخاب شد. این نتایج نشان‌دهنده تطابق

مناسب مدل پیشنهادی با واقعیت‌های سیلاب در منطقه و تأثیر به‌موقع و دقیق روش آنالیز حساسیت در پیش‌بینی پتانسیل سیل‌خیزی است.

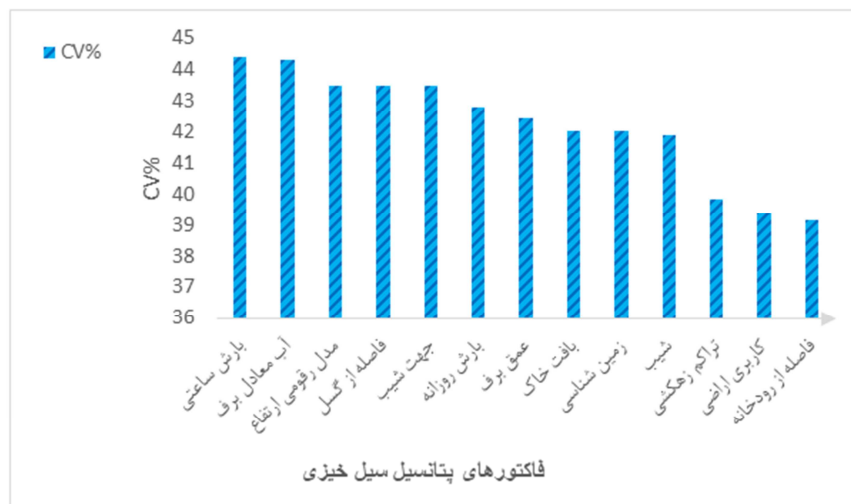


شکل ۵: منحنی اعتبارسنجی ROC و نقشه‌ی دبی پیک دوره بازگشت ۱۰۰ساله

آنالیز حساسیت فاکتورها

نتایج این پژوهش نشان داد که با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل دقیق عوامل مؤثر بر وقوع سیل، امکان بررسی و شبیه‌سازی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبریز گرگانرود به‌طور مؤثر فراهم می‌شود. GIS به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و نمایش داده‌های مکانی در زمینه مدیریت حوضه‌های آبریز، در این پژوهش نقش مهمی ایفا کرده است. در این رویکرد، با حذف تدریجی و گام‌به‌گام هر یک از فاکتورها و بررسی اثرات دیگر فاکتورها با وزن یکسان، نقشه پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از ۱۳ فاکتور مختلف تهیه شد. نتایج تحلیل حساسیت در شکل (۴) نشان داد که فاکتور بارش ساعتی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل سیل‌خیزی داشته و به‌عنوان حساس‌ترین متغیر شناخته شد. سایر فاکتورها مانند آب معادل ذوب برف و ارتفاع نیز به‌ترتیب پس از بارش ساعتی، بیشترین تأثیر را در تغییرات پتانسیل سیل‌خیزی در این حوضه داشتند. این نتایج نشان‌دهنده دقت بالای فن تحلیل حساسیت در شبیه‌سازی تأثیرات مختلف بر پتانسیل سیلاب و شناسایی مناطق مستعد سیل در حوضه آبریز گرگانرود است. این یافته‌ها همچنین با نتایج مطالعات مشابه، همچون مطالعات آرخی و همکاران (۱۴۰۰) همخوانی دارد و نشان‌دهنده اعتبار و کاربردپذیری این روش است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعه جلالیان (۲۰۲۰) به‌وضوح نشان می‌دهد که رویکرد این پژوهش از جامعیت و عمق بیشتری برخوردار است. درحالی‌که جلالیان در پژوهش خود بیشتر بر مدل‌های پیش‌بینی ساده و ابزارهای ابتدایی تحلیل همچون مدل‌های دودویی و تحلیل شبکه‌ای تمرکز کرده است، این پژوهش با استفاده از تحلیل حساسیت به‌صورت گام‌به‌گام، توانسته است تأثیرات دقیق‌تری از فاکتورهای مؤثر بر پتانسیل سیل‌خیزی ارائه دهد. این رویکرد به‌ویژه در شبیه‌سازی تأثیرات فاکتورهایی چون بارش ساعتی و آب معادل ذوب برف که نقش حیاتی در شدت سیلاب‌ها دارند، مؤثر بوده و موجب افزایش دقت پیش‌بینی‌ها شده است. از این‌رو، مدل ارائه‌شده در این پژوهش به‌مراتب قابل‌اعتمادتر و دقیق‌تر از مدل‌های پیشین است. یکی از مهم‌ترین تمایزات این پژوهش نسبت به پژوهش جلالیان، توجه ویژه به تغییرات انسانی است. در این پژوهش، تخریب پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای حوضه‌های آبریز، به‌طور دقیق‌تری مورد بررسی قرار گرفت. این

عوامل انسانی که در پژوهش جلالیان کمتر مورد توجه قرار گرفته بودند، نقش چشمگیری در افزایش شدت سیلاب‌ها ایفا می‌کنند. به‌ویژه، تأثیرات ناشی از تخریب جنگل‌ها و تبدیل آن‌ها به مراتع ضعیف در این پژوهش مورد تجزیه-وتحلیل قرار گرفت و نتایج نشان داد که این تغییرات تأثیر مستقیمی بر افزایش پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه آبریز گرگانرود دارند. این امر موجب دقت بیشتر مدل و توانایی بهتر در پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب تحلیل حساسیت و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نهفته است. این رویکرد ترکیبی امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از پتانسیل سیل‌خیزی در مناطق مختلف فراهم کرده است، به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه که با محدودیت‌های جدی در دسترسی به داده‌های هیدرولوژیکی مواجه هستند. تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزاری پیشرفته، در کنار GIS به‌عنوان فناوری نوین، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر سیلاب‌ها و برنامه‌ریزی مدیریتی جهت کاهش خسارت‌های و تلفات ناشی از سیلاب‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این ترکیب به‌ویژه در مناطقی که داده‌های هیدرولوژیکی محدود هستند، یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی و مدیریت پتانسیل سیل‌خیزی به‌شمار می‌آید. به‌طورکلی، این پژوهش با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی پیچیده‌تر و تلفیق داده‌های محیطی و انسانی، نه‌تنها دقت پیش‌بینی‌های پتانسیل سیل‌خیزی را افزایش داده، بلکه رویکردی نوآورانه برای مدیریت سیلاب‌ها در حوضه‌های آبریز ارائه داده است. این پژوهش می‌تواند الگویی مفید برای مطالعات مشابه در سایر مناطق باشد و ابزارهای مؤثری برای برنامه‌ریزی‌های بهینه در جهت کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب‌ها فراهم آورد.



شکل ۶: حساسیت فاکتورهای مؤثر (در قالب شاخص ضریب تغییرات) در پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبریز گرگانرود

نتیجه‌گیری

سیلاب‌ها از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفیک محسوب می‌شوند که همه ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را در سطح کشور بر جای می‌گذارند. این پژوهش تلاشی به منظور تهیه نقشه‌های پتانسیل خطر وقوع سیل در سطح حوضه آبریز گرگانرود به منظور برنامه‌ریزی برای مدیریت این مخاطره بوده است. در این پژوهش از چهارده پارامتر مؤثر در وقوع سیل به‌همراه داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده شد. به منظور اجرای پژوهش و ارزیابی نتایج آنالیز حساسیت، داده‌ها به ۵ طبقه تقسیم شد. بررسی وزن نهایی پارامترها نشان داد

که مناطق پایین دست حوضه به دلیل ارتفاع و شیب خیلی کم، پهنه‌های نزدیک آبراهه‌ها و پل‌ها بیشترین تأثیر بر وقوع سیل را در منطقه داشته‌اند. با توجه به نتایج نقشه پتانسیل سیل خیزی، چنین برداشت می‌شود که پتانسیل تولید رواناب در حاشیه ارتفاعات جنوب شرقی و غربی این حوضه از جمله شهرهای کلاله، علی‌آباد، مینودشت، گنبد کاووس و آق‌قلا به دلیل بارش‌های فراوان باران و ذوب برف و از بین رفتن جنگل‌ها و تبدیل شدن به مراتع ضعیف دارای بالاترین رده پتانسیل سیل خیزی می‌باشد. به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی راهی سریع در شناسایی مناطق دارای قابلیت‌های مختلف جهت توسعه در یک منطقه از جمله شناسایی مکان‌های مستعد جهت تغذیه مصنوعی به روش پخش سیلاب است. نتیجه‌گیری کلی حاکی از آن است که فن‌های سنجش‌ازدور و GIS در صورت تلفیق با مقادیر سنجش میدانی پارامترهای مورد مطالعه، می‌تواند در حوضه مطالعات محیط‌زیستی رشته مهندسی عمران کاربردهای زیادی داشته باشد.

منابع

- ارخی، صالح؛ یاری‌بیگی، حدیث؛ عمادالدین، سمیه. (۱۴۰۰). «پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود)». *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰(۳)، صص: ۸۶-۱۱۰.
- اسفندیاری، امیرحسین؛ قادری، فرهاد. (۱۴۰۳). «پتانسیل سیل خیزی حوضه سد رجایی». *نشریه مهندسی عمران*، ۵۳(۱۱۳)، صص: ۱۰۰-۱۱۱.
- عابدینی، موسی؛ فتحی‌جوکدان، رقیه. (۱۳۹۵). «پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در گرگانرود». *هیدروژئومورفولوژی*، ۷، صص: ۳-۳۰.
- جلالیان، سید اسحاق. (۱۴۰۱). «پهنه‌بندی سیل خیزی در حوضه گرگانرود». *مایش جغرافیایی فضا*، ۱۱(۴۲)، صص: ۱۴۳-۱۶۲.
- حسین‌زاده، محمد مهدی؛ صالحی‌پور، علیرضا؛ رضائیان، فاطمه. (۱۴۰۲). «حساسیت زیرحوضه‌های نکارود به سیل». *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۰(۳۴)، صص: ۷۵-۱۰۰.
- ضیاییان، پرویز؛ بدرق‌نژاد، ایوب. (۱۳۹۹). «شناسایی مناطق مستعد پخش سیلاب با استفاده از «RS/GIS تحقیقات علوم جغرافیایی»». صص: ۱-۲۴.
- فومنی، سحر؛ وظیفه‌دوست، مجید. (۱۳۹۸). «اثر تغییر کاربری بر سیل خیزی گرگانرود». *شانزدهمین کنگره خاک ایران*، صص: ۱-۷.
- ثقفیان، بهرام؛ فرازجو، حسن؛ سپهری، عادل؛ نجفی‌نژاد، علی. (۱۳۸۵). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر سیل خیزی حوضه آبریز سد گلستان. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۲(۱)، ۱۸-۲۸.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. (۱۳۸۰). *راهنمای مهار سیلاب*. نشریه ۲۴۲.
- شهرضا، علی صالح؛ اصغری، ابراهیم. (۱۳۸۸). *مطالعات منابع آب گرگانرود*. جلد سوم، ۲۹۲ صفحه.
- Avand, M., & Moradi, H. (2021). Using machine learning models, remote sensing, and GIS to investigate the effects of changing climates and land uses on flood probability. *Journal of Hydrology*, 595, 125663.
- DEPC. (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*, L 288(27), 27-34. Retrieved from <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:en:pdf>
- Duangyiwa, C., & Cheewinsiriwat, P. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Model: A Case Study of Chai Nat Province, Thailand. In *Applied Geography and Geoinformatics for Sustainable Development: Proceedings of ICGGS 2022* (pp. 1-17). Cham: Springer International Publishing.
- Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2013). Soil genesis and classification. *Catena*, 104, 251-256.
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. World Bank Publications.
- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural Hazards*, 63, 737-760.
- Luo, W., Li, X., Molloy, I., Di, L., & Stepinski, T. (2014). Web service for extracting stream networks from DEM data. *GeoJournal*, 79, 183-193.

- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 118-133.
- Moglen, G. E., Eltahir, E. A., & Bras, R. L. (1998). On the sensitivity of drainage density to climate change. *Water resources research*, 34(4), 855-862.
- Muleta, M. K., & Nicklow, J. W. (2005). Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 127-145.
- Narmatha, T., Jeyaseelan, A., Mohan, S. P., Mahalingam, S., & Natchimuthu, S. (2013). Morphometric analysis of the upper part of Pambar watershed, Ponnaiyar river basin, Tamil Nadu, India using Geographical Information System. *J. Acad. Indus. Res*, 1(11), 726-729.
- Natarajan, L., Usha, T., Gowrappan, M., Palpanabhan Kasthuri, B., Moorthy, P., & Chokkalingam, L. (2021). Flood susceptibility analysis in Chennai corporation using frequency ratio model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1533-1543.
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67-79.
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515-1545.
- Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., & Mathevet, T. (2007). Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 131-151.
- Peucker, T. K., & Douglas, D. H. (1975). Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Graphics and Image Processing*, 4(4), 375-387.
- Poff, N. L. (2018). Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flow challenges in a non-stationary world. *Freshwater Biology*, 63(8), 1011-1021.
- Pourjavad, E., & Shirouyehzad, H. (2011). An MCDM approach for prioritizing production lines: a case study. *International Journal of Business and Management*, 6(10), 221-229.
- Rahmani, J., & Danesh-Yazdi, M. (2022). Quantifying the impacts of agricultural alteration and climate change on the water cycle dynamics in a headwater catchment of Lake Urmia Basin. *Agricultural Water Management*, 270, 107749.
- Sandu, I., Pescaru, V. I., Poiană, I., Geicu, A., Căndea, I., & Tâstea, D. (2008). Clima României (Climate of Romania). *The Publishing House of the Romanian Academy, Bucharest*.
- Shiau YoJin, S. Y., Wang HsuehChing, W. H., Chen TsaiHuei, C. T., Jien ShihHau, J. S., Tian GuangLong, T. G., & Chiu ChihYu, C. C. (2017). Improvement in the biochemical and chemical properties of badland soils by thorny bamboo.
- Stocker B D, Roth R, Joos F, Spahni R, Steinacher M, Zaehle S, Bouwman L, Xu R, Prentice I C (2013). Multiple greenhouse-gas feedbacks from the land biosphere under future climate change scenarios. *Nat Clim Chang*, 3(7): 666-672.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. *Handbook of applied hydrology*.
- Szmidt, E., & Kacprzyk, J. (2011, August). The Spearman and Kendall rank correlation coefficients between intuitionistic fuzzy sets. In *Proceedings of the 7th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology* (pp. 521-528). Atlantis Press.
- UNISDR (2009). United Nations International Strategy for Disaster Reduction – Terminology on Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland
- Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Panahi, M., Khosravi, K., ... & Costache, R. (2019). Flood susceptibility mapping in Dingnan County (China) using adaptive neuro-fuzzy inference system with biogeography-based optimization and imperialistic competitive algorithm. *Journal of Environmental Management*, 247, 712-729.
- Zaharia, L., Costache, R., Prăvălie, R., & Ioana-Toroimac, G. (2017). Mapping flood and flooding potential indices: a methodological approach to identifying areas susceptible to flood and flooding risk. Case study: the Prahova catchment (Romania). *Frontiers of Earth Science*, 11, 229-247.