

# Flood Hazard Mapping in the Keshkanrud Basin Using a Hybrid Model of Fuzzy-Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay Methods

Ahad Nazarpour<sup>1\*</sup> , Susan Andik<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Associate Prof, Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Email: [Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir](mailto:Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir)    ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1616-5278>

2. MSc. Student, Department of RS&GIS, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> <b>Research Article</b></p> <p><b>Article history:</b>  <b>Received:</b> 05 May 2025  <b>Revised:</b> 16 August 2025  <b>Accepted:</b> 02 September 2025  <b>Published:</b> 22 June 2026</p> <p><b>Keywords:</b>  Flood hazard mapping,  Fuzzy Analytical Hierarchy Process, TOPSIS,  Geographic Information System (GIS),  Kashkanroud.</p>	<p>Floods, as one of the most destructive natural hazards, cause extensive damage worldwide, particularly in mountainous regions of Iran such as the Keshkanrud Basin. This study aimed to map flood hazard zones in the Keshkanrud Basin using a combination of Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and Weighted Overlay methods within a Geographic Information System (GIS) framework. Multiple criteria, including elevation, slope, rainfall, distance from rivers, Topographic Wetness Index (TWI), land use/land cover (LULC), soil type, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and erosion rate, were evaluated. The results revealed that areas such as Pol-e Dokhtar, Khorramabad, Shiravand, and parts of Kuhdasht are at the highest risk of flooding due to their topographic, hydrologic, and land cover characteristics, while northern regions like Alashtar were identified as low-risk zones. These findings align with historical flood data from 2019, which reported a peak discharge of 7,000 m<sup>3</sup>/s and economic losses of 26 million USD in Pol-e Dokhtar. The Fuzzy AHP method, with a correlation coefficient of 0.92, proved to be the most accurate model, classifying 8.2% of the basin as very high-risk and 28.1% as high-risk. The TOPSIS and Weighted Overlay methods also yielded comparable results, with correlation coefficients of 0.89 and 0.87, respectively. This study provides a scientific basis for flood risk management in the Keshkanrud Basin by presenting flood hazard maps and recommending measures such as designing drainage systems, restoring vegetation cover, and implementing urban development management strategies.</p>

**How to Cite:** Nazarpour, A. and Andik, S. (2026). Flood Hazard Mapping in the Keshkanrud Basin Using a Hybrid Model of Fuzzy-Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay Methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15 (48), 117-142.



© The Author/Authors

**Publisher:** University of Sistan and Baluchestan

**DOI:** 10.22111/jneh.2025.51912.2112

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **INTRODUCTION**

Floods, as one of the most common natural hazards, annually cause significant financial and human losses worldwide. In Iran, mountainous regions like the Kashkanrud Basin are prone to destructive floods due to topographic characteristics, intense rainfall, and land use changes. Located in Lorestan Province, the Kashkanrud Basin, due to its position along high-flow rivers and a history of devastating floods (such as the 2019 flood with a discharge of 7,000 m<sup>3</sup>/s and damages of 26 million USD), requires a thorough flood risk assessment. Previous studies have shown that combining multi-criteria decision-making methods, such as Analytical Hierarchy Process, Fuzzy logic, and TOPSIS, with Geographic Information Systems provides a powerful tool for flood hazard zoning. This research aims to provide a comprehensive approach to identify flood-prone areas in the Kashkanrud Basin and propose management strategies.

### **RESULTS AND DISCUSSION**

In this study, flood risk in the Kashkanrud Basin was assessed using topographic, hydrological, and environmental data through raster layers of elevation, slope, rainfall, distance from rivers, topographic wetness index, land use, soil type, normalized difference vegetation index, and soil erosion rate in a Geographic Information System environment. The results indicated that areas with elevations below 500 meters, equivalent to 42.3% of the basin's total area, particularly Pol-e Dokhtar and Khorramabad, are high-risk due to runoff accumulation in low-lying zones, while areas above 1,500 meters (15.7% of the area; Alashtar) were identified as low-risk. Additionally, slopes less than 5 degrees, covering 38.5% of the area, showed a strong correlation of 0.87 with historical floods, providing a robust indicator of high flood risk; these zones were primarily located near rivers and flat plains. Annual rainfall exceeding 800 mm, covering 45.2% of the area in the southern and central parts, showed a significant correlation of 0.85 with flood occurrences. Moreover, areas within 500 meters of riverbeds (33.6% of the area), mainly in Pol-e Dokhtar, were identified as high-risk with a correlation of 0.83. A high topographic wetness index (above 12), covering 29.4% of the area, indicated a risk of runoff accumulation due to water pooling in topographic depressions, with a correlation of 0.81. The analysis of land use revealed that urban areas and bare plains (15.8% of the area) exhibited the highest vulnerability with a correlation of 0.79, while forests and pastures (42.3%) played a mitigating role in flood flow. Regarding soil type, badlands with low permeability (28.4% of the area) were considered high-risk, while entisols (19.6%) were deemed low-risk. Additionally, areas with a normalized difference vegetation index below 0.11 (35.7% of the area) were high-risk with a correlation of 0.80, while areas with vegetation cover above 0.4 (18.9%) were low-risk. Finally, high erosion rates, calculated based on the Universal Soil Loss Equation in Kuhdasht and Pol-e Dokhtar, increased runoff and exacerbated flood risk.

The three multi-criteria decision-making methods—Fuzzy Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay—consistently identified Pol-e Dokhtar, Khorramabad, and Kuhdasht as high-risk zones and Alashtar as low-risk. The most accurate results were obtained with the Fuzzy AHP method, which reported 8.2% of the area as very high-risk and 28.1% as high-risk, with a correlation coefficient of 0.92 with the spring 2019 flood (discharge of 7,000 m<sup>3</sup>/s, damages of 26 million USD). The TOPSIS method, with a correlation of 0.89, and the Weighted Overlay method, with a correlation of 0.87, also showed high agreement with historical data.

### **CONCLUSION**

This study demonstrated that the Kashkanrud Basin, particularly Pol-e Dokhtar, Khorramabad, and Kuhdasht, is at high flood risk due to its topographic, hydrological, and land cover characteristics. The Fuzzy Analytical Hierarchy Process, with a high accuracy (correlation coefficient of 0.92), performed

best in identifying high-risk zones (8.2% very high-risk, 28.1% high-risk). TOPSIS and Weighted Overlay, with acceptable accuracies (0.89 and 0.87, respectively), provided similar results. Incorporating erosion rate as an independent criterion improved the model's accuracy, particularly in erosion-prone areas like Kuhdasht. This study provides a scientific basis for flood risk management in the Kashkanrud Basin and suggests measures such as drainage system design, vegetation restoration, and urban development management to mitigate flood damage.

## ETHICAL CONSIDERATIONS

**Conflict of Interest Statement:** The authors declare no conflict of interest.

**Ethical Statement:** This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

## REFERENCES

- Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2017). Anthrosols and Technosols. In *The Soils of the USA* (pp. 173–187). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4_11)
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A., Zhao, W., & Liu, Y. (2019). Flood-risk zoning based on analytic hierarchy process and fuzzy variable set theory. *Natural Hazards Review*, 20(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000324)
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on a GIS-based hybrid multi-criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, 572, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural Hazards*, 63, 737–760. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0180-y>
- Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>
- Mikhailov, L. (2003). Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, 134(3), 365–385. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00383-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00383-4)
- Kulimushi, L. C., Choudhari, P., Maniragaba, A., Elbeltagi, A., Mugabowindekwe, M., Rwanyiziri, G., & Singh, S. K. (2021). Erosion risk assessment through prioritization of sub-watersheds in Nyabarongo river catchment, Rwanda. *Environmental Challenges*, 5, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100260>
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- 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. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Pathan, S., Pradhan, B., & Alamri, A. (2022). Flood susceptibility mapping using geospatial-based TOPSIS and frequency ratio models: A case study of the Thamarabarani River basin, India. *Geocarto International*, 37(10), 2694–2721. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1844300>
- Pourali, S. H., Arrowsmith, C., Chrisman, N., et al. (2016). Topography Wetness Index application in flood-risk-based land use planning. *Applied Spatial Analysis*, 9, 39–54. <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

## پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان رود با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس و روش وزن‌دهی همپوشانی

احد نظریور<sup>۱\*</sup>، سوسن اندیک<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: [Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir](mailto:Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir) / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1616-5278>

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۴/۰۲/۱۵</p> <p><b>تاریخ ویرایش:</b> ۱۴۰۴/۰۵/۲۵</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۶/۱۱</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۵/۰۳/۱۶</p> <p><b>واژه‌های کلیدی:</b> پهنه‌بندی خطر سیلاب، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس، کشکان‌رود.</p>	<p>سیلاب به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارت‌های گسترده‌ای در جهان به‌ویژه در مناطق کوهستانی ایران مانند حوضه آبریز کشکان‌رود به‌بار می‌آورد. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود، با استفاده از مدل‌های ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. معیارهای متعددی شامل ارتفاع، شیب، بارندگی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مناطق پل‌دختر، خرم‌آباد، شیراوند و بخش‌هایی از کوه‌دشت به‌دلیل شرایط توپوگرافی، هیدرولوژیکی و پوشش زمین، در معرض بیشترین خطر سیل قرار دارند، درحالی‌که نواحی شمالی مانند الشتر کم‌خطر هستند. این یافته‌ها با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ (دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و خسارت‌های ۲۶ میلیون دلاری) هم‌خوانی دارد. روش وزن‌دهی همپوشانی با ضریب همبستگی ۰/۹۲، دقیق‌ترین مدل بود و ۸/۲٪ از مساحت حوضه را در محدوده خطر بسیار بالا و ۲۸/۱٪ را در محدوده خطر بالا طبقه‌بندی کرد. روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نیز به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۸۹ و ۰/۸۷، نتایج مشابهی ارائه دادند. این مطالعه با ارائه نقشه‌های خطر سیل و پیشنهاد اقداماتی نظیر طراحی سیستم‌های زهکشی، احیای پوشش گیاهی و مدیریت توسعه شهری، مبنایی علمی برای کاهش خسارت‌های سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود فراهم می‌کند.</p>

استناد: نظریور، احد و اندیک، سوسن. (۱۴۰۵). پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس و روش وزن‌دهی همپوشانی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱۱۷-۱۴۲.



## مقدمه

مطالعات بسیاری در زمینه خطرات سیل انجام شده است و هدف اصلی کلیه این مطالعات، کاهش مؤلفه‌های تأثیرگذار بر خطر وقوع سیلاب بوده است (Hooijer et al., 2004). عوامل مختلفی مانند تغییرات کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، درجه اشباع خاک، تجاوز به حریم رودخانه‌ها، شدت بارندگی، شیب و نفوذپذیری حوضه نقش مهمی در افزایش احتمال وقوع سیلاب دارند (Yamani & Enayati, 2006). در سنجش شرایط سیل‌خیزی، می‌بایستی کلیه عوامل و فاکتورهای شهری را مورد بررسی قرار داد و توجه صرف به وضعیت سیل‌خیزی بدون توجه به سایر عوامل و پارامترهای شهری، کارگشا نخواهد بود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۸). این پدیده یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی محسوب می‌شود که خسارت‌های مالی و جانی قابل‌توجهی در سراسر جهان به همراه دارد (Kourgialas & Karatzas, 2011).

روش‌های مختلفی برای بررسی و محاسبه پتانسیل بروز سیل ارائه شده است که هر یک بر اساس ویژگی‌ها و داده‌های اطلاعاتی منطقه مورد نظر می‌باشد (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۱</sup> و سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و کنترل بلایای طبیعی مورد استفاده قرار گیرد (Fernández & Lutz, 2010). به‌طور هم‌زمان، اپراتورهای فازی برای لحاظ کردن محدودیت‌های تصمیم‌گیری در توزیع مجدد منابع آب در حوضه‌های رودخانه‌ای توسعه داده شده‌اند (Chen & Chang, 2010).

استفاده از ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب کمک می‌کند (Sepehri et al., 2019; Rahmati et al., 2015). از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مجموعه متغیرهای فازی برای تعیین مناطق در معرض بیشترین خطر سیل استفاده شده است (Jia, J et al., 2019). همچنین، مطالعات سیل‌خیزی انجام‌شده در تایلند نشان داده‌اند که مناطقی که در نزدیک زهکش‌ها، در معرض خطر بیشتری قرار دارند (Yodying et al., 2019). روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۳</sup>، منطق فازی<sup>۴</sup>، رگرسیون لجستیک<sup>۵</sup>، درخت تصمیم<sup>۶</sup>، یادگیری ماشین<sup>۷</sup> و شبکه عصبی مصنوعی<sup>۸</sup> از جمله روش‌هایی هستند که دقت بالایی در پیش‌بینی سیل دارند (Kanani-Sadat et al., 2019; Malik et al., 2020). همچنین، روش منطق فازی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پیشرفته‌ترین روش‌های آماری برای تعیین حساسیت سیل مطرح شده است (Wang et al., 2020). امروزه رشد بی‌رویه جمعیت، تسطیح زمین و اشغال حریم رودخانه‌ها و مسیل‌ها در کنار عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی در شهرهای بزرگ سبب گسترش سیلاب‌های شهری شده است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۵). تصمیم‌گیری چندمعیاره با ارزیابی گزینه‌های مختلف بر اساس معیارهای متعدد، می‌تواند موجب کاهش سوگیری در تصمیم‌گیری‌های پیچیده شود (Kulimushi, L. et al., 2021).

در تانزانیا، تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داده است که ۴۰/۲۷ درصد از محدوده مطالعاتی در محدوده خطر سیل بسیار زیاد و ۵۹/۷۳ درصد در محدوده خطر زیاد قرار دارد (Makony &

<sup>1</sup> Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA)

<sup>2</sup> Geographical Information system (GIS)

<sup>3</sup> AHP

<sup>4</sup> Fuzzy Logic

<sup>5</sup> Logistic Regression

<sup>6</sup> Decision Trees

<sup>7</sup> Machine Learning

<sup>8</sup> Artificial Neural Network

(Msabi, 2021). در ایران، بررسی پهنه‌بندی خطر سیل در منطقه یک کلان‌شهر تهران با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که پهنه‌های خطر بسیار زیاد و زیاد بیشتر منطبق بر نقاط خروجی حوضه‌ها و مناطق شهری هستند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، در شهر ایلام، پهنه‌بندی با استفاده از رویکرد تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی نشان داد که مناطق شمال و شمال غربی این شهر دارای احتمال خطر سیل بالاتری هستند (زیاری و همکاران، ۱۴۰۰).

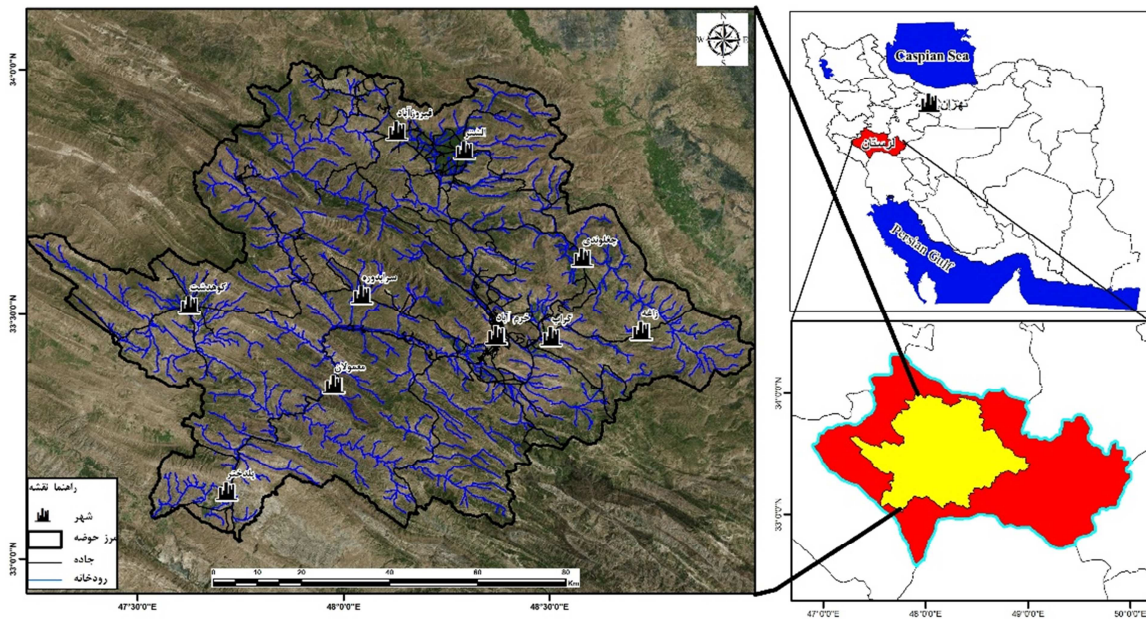
هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک رویکرد جامع و دقیق برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی در منطقه کشکانرود است. با توجه به افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در این منطقه، شناسایی پهنه‌های مستعد سیل و ارائه راه‌کارهای کارآمد برای کاهش خطرات ناشی از آن ضروری است. در این راستا، این مطالعه از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل سلسله‌مراتبی، تاپسیس و تحلیل وزن‌دهی همپوشانی بهره می‌برد تا دقت ارزیابی‌های مکانی را افزایش داده و تصویری شفاف‌تر از خطرات احتمالی ارائه دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری و محیط‌زیستی فراهم آورد تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت بهینه منابع در برابر سیلاب‌های آتی اتخاذ شود.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

کشکانرود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های غرب ایران است که در استان لرستان جریان دارد و از شاخه‌های اصلی رودخانه کرخه محسوب می‌شود (شکل ۱). این رودخانه پس از عبور از مناطق مختلف، به رودخانه سیمره و سپس به کرخه می‌ریزد. حوضه آبریز کشکان شامل چندین زیرحوضه است که پل‌دختر، کوه‌دشت، خرم‌آباد، شیراوند، الشتر و چغلوندی از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. پل‌دختر، به دلیل قرارگیری در حوضه آبریز کشکان و سیمره، یکی از مستعدترین مناطق سیل‌خیز استان محسوب می‌شود. عرض زیاد رودخانه، شیب کم در پایین‌دست و بارش‌های ناگهانی از عوامل اصلی وقوع سیلاب‌های مخرب در این منطقه است. سیل بهار سال ۱۳۹۸ خسارت‌های زیادی به این شهر وارد کرد.

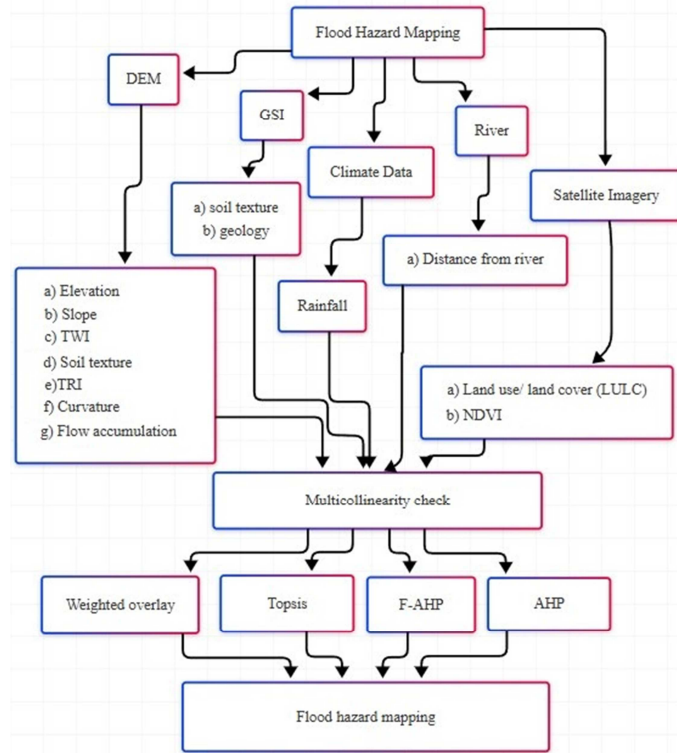
بر اساس گزارش‌های ارائه‌شده توسط تیم کشوری سازمان ملل متحد در ایران، بارش‌های شدید و پی‌درپی بر روی حوضه آبریز پل‌دختر در فروردین ماه سال ۱۳۹۸، باعث سیل ویرانگری در امتداد رودخانه کشکان و شاخه‌های فرعی آن با دبی بیش از ۷۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه شد (Parsian et al., 2021). میانگین بلندمدت دبی رودخانه کشکان ۳۰ متر مکعب بر ثانیه است. در بهار ۱۳۹۸، سیل در پل‌دختر خسارت‌های اقتصادی سنگینی به بار آورد. ارزش خسارت‌های واردشده به تأسیسات تولیدی، ساختمان‌ها و دارایی‌های کشاورزی حدود ۲۶ میلیون دلار آمریکا برآورد شده است (Parsian et al., 2021). حدود ۵۷ پل و پل‌آبرو و ۲۵۰ کیلومتر از جاده‌های اصلی در این استان آسیب دیده است. علاوه بر خسارت‌های مالی در استان لرستان، بیش از ۴۶۰۰۰ خانوار تحت تأثیر منفی قرار گرفته‌اند و بسیاری از مردم مجبور شده‌اند اموال و دارایی‌های خود را رها کنند (Parsian et al., 2021).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و آبراهه‌های حوضه آبریز کشکان رود

#### داده‌ها

در این پژوهش، با هدف تهیه نقشه خطر سیل، از ترکیبی از داده‌های مختلف استفاده شده است. این داده‌ها شامل اطلاعاتی در مورد توپوگرافی منطقه (مانند ارتفاع، شیب)، پوشش زمین (کاربری اراضی، نوع خاک، پوشش گیاهی)، آب و هوا (بارندگی) و فاصله از رودخانه است. همچنین برای انجام این پژوهش، از روش‌های مختلفی مانند مطالعه اسناد و گزارش‌های موجود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی بهره گرفته شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده در قالب لایه‌های اطلاعاتی مختلفی سازماندهی شده و سپس با استفاده از فن‌های فازی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. فن‌های فازی به محققان اجازه می‌دهد تا داده‌های کیفی و کمی را با هم ترکیب کرده و به نتایج دقیق‌تری دست یابند. هر یک از این معیارها به صورت یک لایه اطلاعاتی مجزا نمایش داده شده و سپس با استفاده از توابع فازی، به یکدیگر ترکیب شده‌اند. در نهایت، با ترکیب تمام این لایه‌ها، نقشه نهایی خطر سیل تهیه شده است (شکل ۲).



شکل ۲: مدل سلسله‌مراتبی تحلیل خطر سیل در حوضه کشکانرود

### روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP):

توماس ال. ساعتی روش تحلیل سلسله‌مراتبی را در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی ایجاد کرد. این مدل در ابتدا در بخش بازاریابی مورد استفاده قرار گرفت (Saaty, 1987). این روش، یک روش کارآمد برای حل مسائل پیچیده است (Sowissi et al., 2022). با توجه به تأثیر هر لایه در ایجاد نقشه‌ی مستعد سیلاب، وزن هر لایه متفاوت است. روش تحلیل سلسله‌مراتبی از ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی<sup>۱</sup> برای مقایسه وزن هر کلاس در یک لایه موضوعی و همچنین بین لایه‌های موضوعی مختلف استفاده می‌کند. بنابراین، وزن نسبی هر عامل با استفاده از مقیاس ساعتی (Saaty, 1980) که بین ۱ تا ۹ متغیر است، محاسبه شد (جدول ۱). این روش به‌عنوان فن دانش‌محور شناخته می‌شود و مرحله اساسی و ضروری این فن است (Mitra et al., 2022).

جدول ۱: مقیاس مقایسات زوجی ساعتی

مقدار	تعریف	توضیح
۱	اهمیت یکسان	دو معیار اهمیت یکسانی دارند
۳	اهمیت متوسط	یک معیار کمی مهم‌تر از معیار دیگر است
۵	اهمیت زیاد	یک معیار به‌طور قابل‌توجهی مهم‌تر از معیار دیگر است
۷	اهمیت بسیار زیاد	یک معیار خیلی مهم‌تر از معیار دیگر است
۹	اهمیت فوق‌العاده زیاد	یک معیار به‌طور مطلق مهم‌تر از معیار دیگر است
۲ و ۴ و ۶ و ۸	مقادیر میانی	زمانی استفاده می‌شود که نیاز به سطحی بین دو مقدار اصلی باشد.

<sup>1</sup> Pairwise Comparison Matrices

بررسی سازگاری قضاوت‌ها برای تأیید قابلیت اطمینان و پذیرش تصمیمات کارشناسان در مقایسات زوجی هر عامل شرطی، بسیار مهم است (Mitra et al., 2022). این سازگاری با استفاده از نسبت سازگاری<sup>۱</sup> (CR) ارزیابی می‌شود که به شاخص تصادفی<sup>۲</sup> (RI) وابسته است (جدول ۲). این شاخص‌ها به‌عنوان معیاری ثابت برای ارزیابی دقت مقایسه‌ها استفاده می‌شوند (Saaty, 1980).

جدول ۲: شاخص سازگاری تصادفی (Saaty, 1988).

Number of Criteria (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.12	1.24	1.32

نسبت سازگاری (CR) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

در اینجا، CR نسبت سازگاری، CI شاخص سازگاری و RI شاخص تصادفی ثابت شده است (جدول ۲). مقدار CI با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

نتایج محاسبات سازگاری برای این مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به اینکه  $CR = 0.05$  کمتر از  $0.1$  است، مدل از نظر سازگاری مورد قبول است (Mitra et al., 2021).

جدول ۳: شاخص سازگاری تصادفی (Saaty, 1988).

$\lambda_{max}$	n	CI	CR
9.682742	9	0.085343	0.058857

در روش روش تحلیل سلسله‌مراتبی، یک ماتریس مربعی  $A = (a_{ij})$  ایجاد شد که در آن n معیار برای پارامترهای مستعد سیلاب نیاز به مقایسه داشتند. معادله (۳) برای محاسبه  $a_{ij}$  از عناصر ماتریس اعمال شد:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (3)$$

در مورد ماتریس‌های مقایسه زوجی (PCM)،  $a_{ij}$  از تساوی  $a_{ij} = \frac{P_i}{P_j}$  پیروی می‌کند. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، مقیاس نسبی<sup>۳</sup> از این ماتریس محاسبه می‌شود تا وزن‌ها یا رتبه‌ها به معیارها یا گزینه‌ها اختصاص داده شوند. این فرآیند شامل مراحل زیر است (Mikhailov, 2003):

مرحله ۱: تمام عناصر ستون / سطر ماتریس A را با استفاده از معادله (۴) جمع می‌شوند.

$$\frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_n}{P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j} \quad (4)$$

مرحله ۲: مقادیر نرمال شده با استفاده از معادله (۵) محاسبه شدند (جدول ۴).

$$\frac{\frac{P_i}{P_j}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j}} = \frac{P_i}{P_j} \times \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

<sup>1</sup> Consistency Ratio

<sup>2</sup> Random Index

<sup>3</sup> Relative Ratio Scale

مرحله ۳: در این مرحله، وزن یا رتبه هر معیار  $W_i$  با محاسبه میانگین عناصر سطر مربوطه از ماتریس نرمال شده تعیین می‌شود (جدول ۵) (معادله ۶).

$$W_i = \left( \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} + \dots + \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \times \frac{1}{n} \quad (6)$$

در نهایت وزن نهایی معیارها بر اساس میانگین سطرها در جدول (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۴: ماتریس مقایسات نرمال شده

	DEM	Rainfall	Distance from River	LULC	TWI	Slope	Soil Type	NDVI	erosion rate
DEM	0.32732	0.3999	0.28571	0.29847	0.38997	0.23622	0.24138	0.20253	0.2
Rainfall	0.16366	0.19995	0.28571	0.29847	0.11142	0.23622	0.17241	0.17722	0.17778
Distance from River	0.16366	0.09998	0.14286	0.19898	0.11142	0.09449	0.2069	0.1519	0.13333
LULC	0.10911	0.06665	0.07143	0.09949	0.27855	0.18898	0.10345	+0.17722	0.17778
TWI	0.04676	0.09998	0.07143	0.0199	0.05571	0.14173	0.13793	0.12658	0.13333
Slope	0.06546	0.03999	0.07143	0.02487	0.01857	0.04724	0.06897	0.07595	0.06667
Soil Type	0.04676	0.03999	0.02381	0.03316	0.01393	0.02362	0.03448	0.05063	0.04444
NDVI	0.04091	0.02856	0.02381	0.01421	0.01114	0.01575	0.01724	0.02532	0.04444
erosion rate	0.03637	0.02499	0.02381	0.01244	0.00929	0.01575	0.01724	0.01266	0.02222

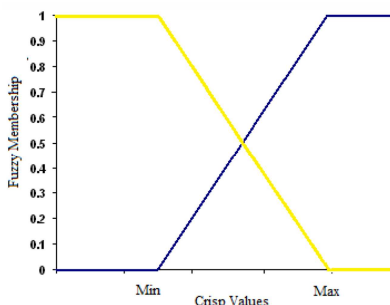
جدول ۵: مقدار وزن هر پارامتر ورودی که با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین شده است.

	DEM	Rainfall	Distance from River	LULC	TWI	Slope	Soil Type	NDVI	erosion rate
وزن معیارها	0.287	0.203	0.145	0.141	0.093	0.053	0.035	0.025	0.019

تمامی مجموعه داده‌های ورودی با استفاده از یک تابع عضویت فازی خطی به مقادیر فازی تبدیل شدند. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، یک تابع عضویت فازی خطی، مقادیر ورودی هر مجموعه داده را بر اساس معادله (۷) به بازه ۰ تا ۱ تبدیل می‌کند (Parsian et al., 2021). در این تبدیل، مقدار صفر و یک به ترتیب نشان‌دهنده پیکسل‌هایی با پتانسیل بسیار کم و بسیار زیاد برای خطر سیلاب هستند. بر این اساس، برای دو پارامتر ورودی یعنی بارش و شاخص رطوبت توپوگرافی از یک تابع خطی با شیب مثبت استفاده شده است. درحالی‌که برای سایر پارامترها یعنی مدل ارتفاع رقومی، شیب، فاصله از رودخانه اصلی، کاربری اراضی و پوشش زمین، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش، یک تابع خطی با شیب منفی در نظر گرفته شده است (Parsian et al., 2021).

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{or } 0 \quad x > \text{Max} \\ 0 & \text{or } 1 \quad x < \text{Min} \\ \frac{x - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} & \text{Min} < x < \text{Max} \end{cases} \quad (7)$$

در اینجا، Max و Min به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر حداکثر و حداقل هر پارامتر هستند، و x مقدار پیکسل مربوط به هر پارامتر است.



شکل ۳: توابع عضویت فازی خطی با شیب مثبت (آبی) و شیب منفی (زرد) که در مرحله فازی سازی استفاده شده‌اند

### فن رتبه‌بندی بر اساس شباهت به مدل راه‌حل ایده‌آل تاپسیس

روش تاپسیس<sup>۱</sup> که اولین بار توسط هوانگ<sup>۲</sup> و یوون<sup>۳</sup> در سال (۱۹۸۱) مطرح شد، یک رویکرد رتبه‌بندی بر اساس مفهوم راه‌حل ایده‌آل مثبت<sup>۴</sup> و منفی<sup>۵</sup> است که از فاصله اقلیدسی برای ارزیابی نزدیکی نسبی گزینه‌ها به این نقاط استفاده کرده است (Hwang, Yoon & 1981). در این روش، گزینه‌ای بهینه است که نزدیک‌ترین فاصله را به راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. برخلاف روش ترکیب خطی وزن‌دار<sup>۶</sup> که مقادیر مطلق شاخص‌ها را محاسبه می‌کند، تاپسیس تغییرات حدی شاخص‌ها را نیز در اولویت‌بندی لحاظ می‌کند و برای تحلیل داده‌های رستری و ارزیابی ریسک در سیستم اطلاعات جغرافیایی مناسب است (Rao, 2007).

برای استفاده از مدل تاپسیس، باید مراحل زیر طی شوند:

#### مرحله ۱: ساخت ماتریس تصمیم نرمال شده وزنی

ماتریس تصمیم نرمال شده وزنی  $D$  از معادله (۸) زیر به دست می‌آید.

$$D = (V_{ij})_{m \times n} = (W_{ij}X_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (8)$$

که در آن  $X_{ij}$  مقادیر ویژگی استاندارد شده گزینه  $i$ -ام در معیار  $j$ -ام است و وزن نرمال شده معیار  $j$ -ام است که باید از سایر روش‌های وزن‌دهی استخراج شود یا توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین گردد. جهت درک بهتر این مرحله، نمایش گرافیکی مقایسه‌ی دو عدد فازی مثلثی در شکل (۴) ارائه شده است (Rao, 2007).

#### مرحله ۲: ساخت راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$PIS = \{v_1^+, \dots, v_n^+\}, \quad v_i^+ = \{\max(v_{ij}), j \in J; \min(v_{ij}), j \in J'\} \quad (9)$$

$$NIS = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}, \quad v_i^- = \{\max(v_{ij}), j \in J; \min(v_{ij}), j \in J'\} \quad (10)$$

که در آن  $J$  و  $J'$  زیرمجموعه‌ای از معیارهای سود (مثبت) و هزینه (منفی) هستند.

<sup>1</sup> TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

<sup>2</sup> Hwang

<sup>3</sup> Yoon

<sup>4</sup> PIS (Positive Ideal Solution)

<sup>5</sup> NIS (Negative Ideal Solution)

<sup>6</sup> Weighted Linear Combination (WLC)

مرحله ۳: محاسبه فاصله هر گزینه راه حل ایده آل مثبت و منفی است:

فاصله گزینه‌ها از راه حل ایده آل مثبت و منفی از طریق فاصله اقلیدسی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$di^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, \dots, m \quad (11)$$

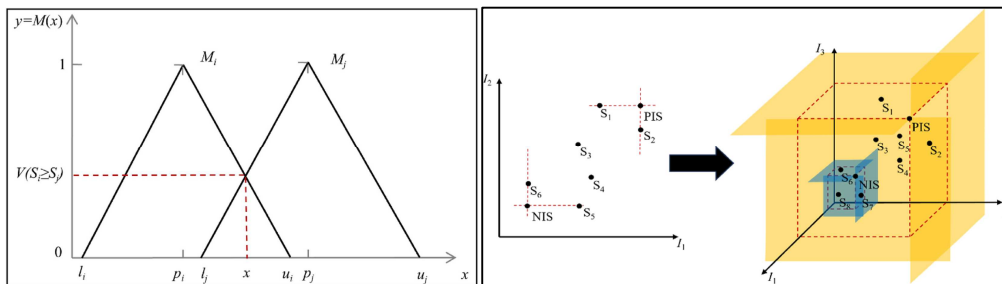
$$di^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad (12)$$

مرحله ۴: محاسبه نزدیکی نسبی گزینه  $i$ -ام به راه حل ایده آل  $C_i$

نزدیکی نسبی هر گزینه  $C_i$  به راه حل ایده آل مثبت، با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_i = \frac{di^-}{di^+ + di^-}, 0 \leq C_i \leq 1, i = 1, \dots, m \quad (13)$$

در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مقدار  $C_i$  رتبه‌بندی می‌شوند. اگر  $C_i = 1$  باشد، گزینه به راه حل ایده آل مثبت برابر است. بنابراین، هرچه  $C_i$  بزرگ‌تر باشد، آن گزینه به راه حل ایده آل مثبت نزدیک‌تر بوده و به عنوان گزینه بهتر در نظر گرفته می‌شود. نمودار شماتیک اصلی روش تاپسیس در دو و سه بُعد در شکل (۵) ارائه شده است (Sun et al., 2024).



شکل ۵: نمودار شماتیک اصلی روش تاپسیس در دو و سه بعد

شکل ۴: نمایش گرافیکی مقایسه‌ی دو عدد فازی مثلثی

### روش وزن دهی همپوشانی

روش وزن دهی همپوشانی یک روش ساده برای پهنه‌بندی خطر در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی است که لایه‌های مختلف را با وزن‌های مشخص ترکیب می‌کند (جدول ۴). در این پژوهش، معیارهایی مانند ارتفاع، شیب، بارندگی و نرخ فرسایش به صورت لایه‌های رستری آماده و در بازه  $[0, 1]$  نرمال‌سازی شدند (۰ کم‌خطر و ۱ پرخطر). هر معیار یک وزن ( $W_i$ ) دریافت می‌کند که نشان‌دهنده اهمیت آن در خطر سیل است. این وزن‌ها در این مطالعه بر اساس نظرات کارشناسی تعیین شدند (نه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی) و مجموع آنها برابر ۱ است (قیصری، ۱۳۹۴).

سپس لایه‌ها با فرمول زیر ترکیب می‌شوند تا نقشه خطر سیلاب خیزی تولید شود:

$$S = \sum_{i=1}^n R_i \times W_i \quad (14)$$

که در آن  $S$  امتیاز خطر هر پیکسل،  $W_i$  وزن معیار  $i$ ،  $R_i$  مقدار نرمال‌شده معیار  $i$  است. خروجی به ۵ کلاس خطر بسیار کم تا بسیار زیاد تقسیم می‌شود.

## نتایج پژوهش

برای ارزیابی دقیق پتانسیل خطر سیل در حوضه آبریز کشکان رود، معیارهای متعددی شامل ارتفاع، شیب، بارندگی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور سنجش ارتباط این معیارها با وقوع سیل، ضرایب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده هر معیار و داده‌های تاریخی سیلاب سال ۱۳۹۸ محاسبه شد. این ضرایب با استفاده از رابطه همبستگی پیرسون که میزان ارتباط خطی بین مقادیر فازی شده معیارها و شدت خسارت‌های سیل (بر اساس دبی ۷۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه) را می‌سنجد، به دست آمدند. همچنین، تحلیل‌های ترکیبی برخی معیارها (مانند تعامل شیب با نوع خاک یا فاصله از رودخانه با بارندگی) انجام شد تا تأثیرات متقابل آن‌ها بر خطر سیل مشخص شود. جدول (۶)، ضرایب همبستگی پیرسون را برای هر معیار و ترکیب‌های منتخب ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده ارتباط قوی این عوامل با پتانسیل وقوع سیل است. در ادامه، هر یک از این معیارها به صورت جداگانه شرح داده می‌شوند تا نقش آن‌ها در پهنه‌بندی خطر سیل به طور دقیق‌تر بررسی شود.

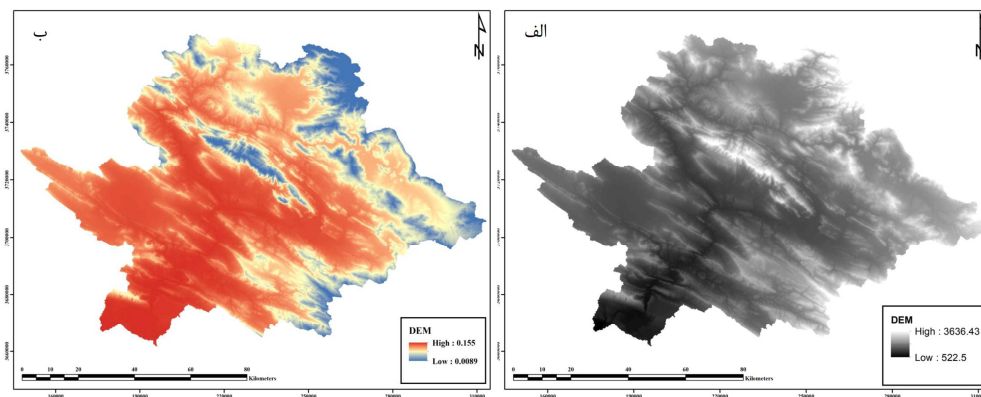
جدول ۶: ضرایب همبستگی پیرسون معیارهای پهنه‌بندی خطر سیل با داده‌های تاریخی سیلاب ۱۳۹۸ در حوضه آبریز کشکان رود

معیار	ضریب همبستگی پیرسون با داده‌های تاریخی سیلاب ۱۳۹۸	توضیحات
ارتفاع	۰/۸۷	همبستگی قوی بین ارتفاع کم و وقوع سیل (مناطق با ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر).
شیب	۰/۸۷	شیب‌های کم (کمتر از ۵ درجه) با خطر بالای سیل همبستگی دارند.
بارندگی	۰/۸۵	بارندگی بالای ۸۰۰ میلی‌متر در سال با خطر بالای سیل مرتبط است.
فاصله از رودخانه	۰/۸۳	فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از رودخانه با خطر بالای سیل همبستگی دارد.
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۸۱	مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بالاتر از ۱۲ با خطر بالای سیل مرتبط است.
کاربری اراضی	۰/۷۹	مناطق شهری و دشت‌های بدون پوشش با خطر بالای سیل همبستگی دارند.
نوع خاک	۰/۸۲	خاک‌های بایر (بدلندها) با خطر بالای سیل همبستگی دارند.
شاخص پوشش گیاهی	۰/۸۰	شاخص پوشش گیاهی کمتر از ۰/۱۱ با خطر بالای سیل همبستگی دارند.
نرخ فرسایش	۰/۸۰	فرسایش بالا با افزایش رواناب و خطر سیل همبستگی دارد.
<b>ترکیب معیارها</b>		
شیب و نوع خاک	۰/۹۲	مناطق با شیب کم و خاک‌های نفوذناپذیر (بدلندها) دارای افزایش خطر سیل دارند.
فاصله از رودخانه، شیب و بارندگی	۰/۸۹	مناطق نزدیک به رودخانه با شیب کم و بارندگی بالا خطر سیل بیشتری دارند.
کاربری اراضی، شیب و بارندگی	۰/۸۶	مناطق شهری با شیب کم و بارندگی بالا خطر سیل بیشتری دارند.

## مدل رقومی ارتفاع

ارتفاع یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ریسک سیل است؛ زیرا به طور مستقیم بر الگوهای هیدرولوژیکی و توزیع جریان آب در حوضه آبریز تأثیر می‌گذارد. مناطق با ارتفاع کمتر به دلیل قرار گرفتن در نقاط پست‌تر، به عنوان نواحی تجمع آب شناخته می‌شوند و بنابراین، نسبت به مناطق مرتفع‌تر، مستعدتر به وقوع سیلاب هستند (Li et al.,

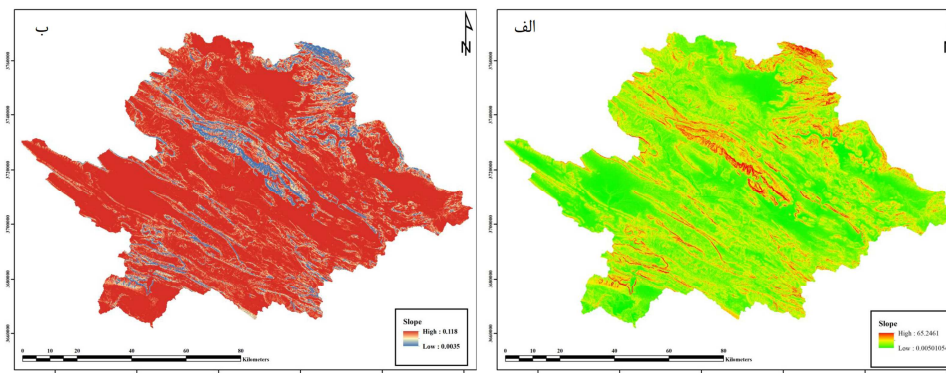
(Nedkoy et al., 2012; Nedkoy et al., 2012). این رفتار به دلیل تفاوت در پتانسیل گرانشی جریان آب است، به طوری که در مناطق کم ارتفاع، سرعت تخلیه آب کاهش یافته و احتمال آب گرفتگی افزایش می یابد (Ouma & Tateishi, 2014). نقشه فازی حاصل از این فرآیند نشان داد که ۴۲/۳٪ از مساحت حوضه آبریز کشکانرود در محدوده ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر قرار دارد و به عنوان مناطق با خطر بالای سیل شناسایی شده است. این مناطق بیشتر در بخش های جنوبی و مرکزی حوضه، به ویژه در نزدیکی پل دختر و خرم آباد، واقع شده اند که با داده های تاریخی سیلاب، از جمله سیل ویرانگر فروردین ۱۳۹۸، هم خوانی دارد. در مقابل، نواحی مرتفع تر (بیش از ۱۵۰۰ متر) که بیشتر در بخش های شمالی حوضه (مانند الشتر) قرار دارند، تنها ۱۵/۷٪ از مساحت را تشکیل داده و به عنوان مناطق کم خطر طبقه بندی شده اند (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه های مدل رقمی ارتفاع (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

### شیب

شیب زمین به طور مستقیم بر جریان سطحی، نفوذ آب و تجمع رواناب تأثیر دارد. شیب های کم با کاهش سرعت آب، باعث افزایش نفوذ و تجمع رواناب و در نتیجه افزایش خطر سیل می شوند، در حالی که شیب های تند (ارتفاعات) به تخلیه سریع تر و کاهش تجمع آب منجر می شوند (Ouma & Tateishi, 2014; Kazakis et al., 2015). در حوضه کشکانرود، میانگین شیب ۱۲/۷ درجه و دامنه آن ۰ تا ۲۴۱/۳۶ درجه است. حدود ۳۸/۵٪ منطقه دارای شیب کمتر از ۵ درجه (خطر بالای سیل) و ۱۲/۴٪ منطقه شیب بیش از ۲۰ درجه (خطر پایین) دارد. ضریب همبستگی پیرسون (۰/۸۷) بین شیب کم و داده های تاریخی سیلاب، رابطه قوی آنها را تأیید کرد. مناطق مستعد سیل (مانند پل دختر و خرم آباد) در بخش های جنوبی و مرکزی حوضه واقع اند که با داده های تاریخی سیلاب منطبق است. تحلیل ترکیبی نیز نشان داد که در مناطق کم شیب با خاک های نفوذپذیری کم، خطر سیل به طور قابل توجهی افزایش می یابد (ضریب همبستگی ۰/۹۲). با این وجود، دقت داده ها در مناطق پرتراکم یا شیب های تند ممکن است محدودیت هایی داشته باشد.

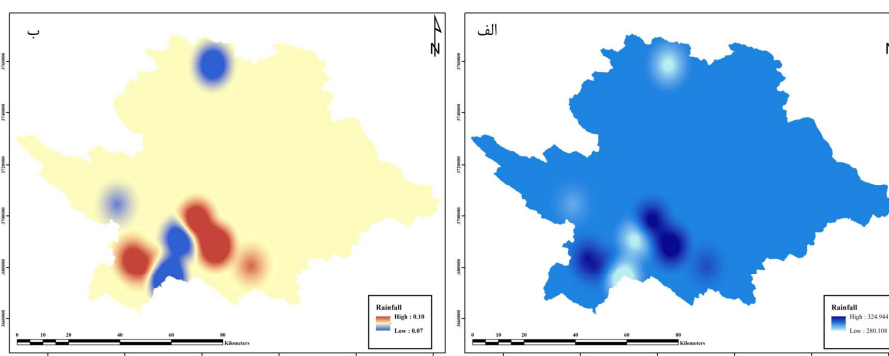


شکل ۷: نقشه‌های شیب (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

### بارندگی

بارندگی یکی از پارامترهای کلیدی و اساسی در نگاشت خطر و حساسیت سیل محسوب می‌شود؛ زیرا به‌طور مستقیم بر حجم رواناب و پتانسیل وقوع سیلاب تأثیر می‌گذارد (Kay et al., 2006; Wang et al., 2019). در این مطالعه، داده‌های جمع‌آوری شده از ۱۵ ایستگاه سینوپتیک محلی در حوضه آبریز کشکان رود مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل این داده‌ها نشان داد که میانگین بارندگی سالانه در منطقه بین ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر متغیر است و با حداکثر بارش در بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه، به‌ویژه در پل دختر که با وقوع سیلاب‌های تاریخی، مانند سیل فروردین ۱۳۹۸، هم‌راستا است. این الگو با داده‌های ثبت‌شده از سیل ۱۳۹۸ که دبی بیش از ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه را به همراه داشت، تطابق دارد و نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین شدت بارندگی و خطر سیل است.

نقشه فازی شده بارندگی که با استفاده از تابع خطی افزایشی تهیه شده، نشان می‌دهد که ۴۵٪ از مساحت حوضه در محدوده بارندگی بالای ۸۰۰ میلی‌متر در سال قرار دارد و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با بارندگی کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در سال که ۱۸٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده بارندگی و داده‌های تاریخی سیلاب برابر با ۰/۸۵ محاسبه شد که ارتباط قوی بین شدت بارش و وقوع سیل را تأیید می‌کند. نقشه ارائه‌شده، با مقیاس رنگی از آبی (خطر کم) به قرمز (خطر زیاد)، این توزیع را به وضوح نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مناطق جنوبی و مرکزی (مانند پل دختر) با رنگ‌های قرمز غالب، مستعدترین نواحی برای سیل شناخته شده‌اند، درحالی‌که بخش‌های شمالی (مانند الشتر) با رنگ‌های آبی، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۸).



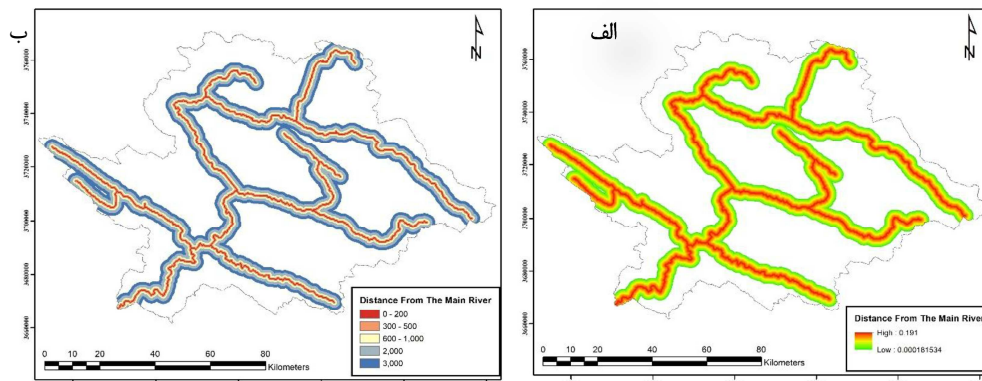
شکل ۸: نقشه‌های بارندگی (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

### فاصله از رودخانه‌های اصلی

فاصله از رودخانه‌های اصلی یکی از عوامل تعیین‌کننده در توزیع و شدت سیلاب محسوب می‌شود؛ زیرا مناطق نزدیک‌تر به رودخانه‌ها به دلیل قرار گرفتن در مسیر مستقیم جریان آب، بیشتر در معرض سیلاب‌های مخرب قرار دارند (Glenn et al., 2012; Peucker & Douglas, 1975). این ویژگی به‌ویژه در حوضه‌های آبریز با رودخانه‌های پرآب مانند کشکانرود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، جایی که نزدیکی به آبراهه‌ها می‌تواند خطر آب‌گرفتگی و خسارت‌های ناشی از سیل را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

در این مطالعه، تحلیل فاصله از رودخانه‌های اصلی نشان داد که ۳۳/۶٪ از مساحت حوضه آبریز کشکانرود در فاصله کمتر از ۵۰۰ متری رودخانه‌ها قرار دارد و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با فاصله بیش از ۲۰۰۰ متر که ۲۵/۸٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی‌شده فاصله از رودخانه و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸) برابر با ۰/۸۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین نزدیکی به رودخانه‌ها و وقوع سیل است. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق نزدیک به رودخانه کشکان (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۹). نقشه‌های ارائه‌شده که فاصله از رودخانه‌های اصلی را به‌صورت خام و فازی‌شده نمایش می‌دهند، این الگو را تأیید می‌کنند. نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی از آبی (فاصله کم: ۰ متر) تا قرمز (فاصله زیاد: ۳۰۰۰ متر)، توزیع فاصله‌ها را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی‌شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۰۰۰۷۸۵۴۴۱۶) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۱۹۱)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس این معیار ارزیابی می‌کند. مناطق نزدیک به رودخانه‌ها (مانند پلدختر و بخش‌هایی از خرم‌آباد) با رنگ قرمز در نقشه فازی‌شده، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، در حالی که نواحی دورتر (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۹).

تحلیل تأثیرات متقابل فاصله از رودخانه با سایر پارامترها (مانند شیب و بارندگی) نشان داد که در مناطقی با فاصله کم از رودخانه، شیب کم و بارندگی بالا، خطر سیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ترکیبی ۰/۸۹). با این حال، این تحلیل با برخی محدودیت‌ها مواجه است. دقت استخراج شبکه آبراهه‌ها ممکن است به دلیل محدودیت‌های مدل رقومی ارتفاع در مناطق با پوشش گیاهی متراکم یا شیب‌های تند تحت تأثیر قرار گیرد (Fernández & Lutz, 2010). همچنین، تغییرات فصلی در مسیر رودخانه‌ها یا انحراف جریان به دلیل فعالیت‌های انسانی (مانند سدسازی) ممکن است بر دقت نتایج اثر بگذارد.



شکل ۹: نقشه‌های فاصله از رودخانه‌های اصلی (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان‌رود

### شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۱</sup>

شاخص رطوبت توپوگرافی، ابزاری کلیدی برای ارزیابی فرآیندهای هیدرولوژیکی است؛ زیرا نشان می‌دهد که چگونه شیب و توپوگرافی بر تجمع آب در یک مکان خاص تأثیر می‌گذارد. این شاخص تمایل یک منطقه به تجمع آب را توصیف می‌کند و به‌طور گسترده برای پیش‌بینی رطوبت خاک و شناسایی نواحی مستعد رواناب و سیلاب استفاده می‌شود (Beven & Kirkby, 1979; Pourali et al., 2014; Fernández & Lutz, 2010). در حوضه‌های آبریز با توپوگرافی متنوع مانند کشکان‌رود، شاخص رطوبت توپوگرافی، می‌تواند به شناسایی مناطقی که به دلیل تجمع آب در معرض خطر سیل قرار دارند، کمک کند.

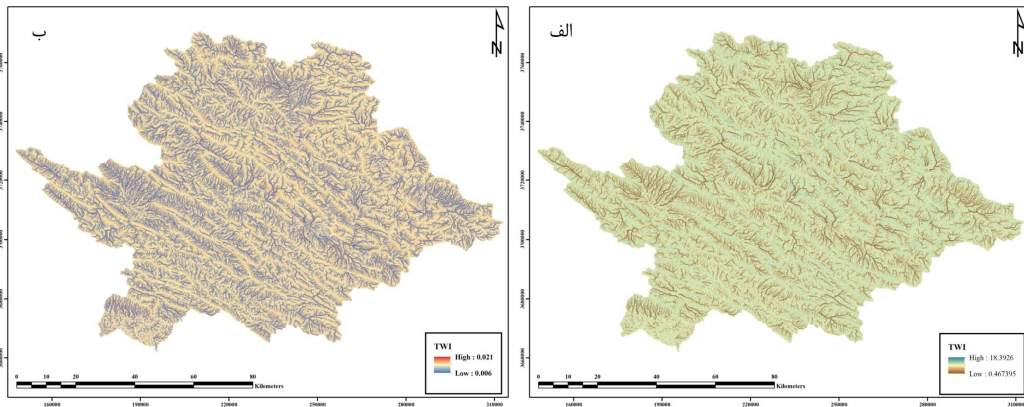
$$TWI = \ln\left(\frac{AS}{\tan\beta}\right) \quad (17)$$

در این مطالعه، تحلیل شاخص رطوبت توپوگرافی نشان داد که مقادیر این شاخص در حوضه آبریز کشکان‌رود بین ۰/۴۶۷۳۹۵ تا ۱۸/۳۰۷۳۹۵ متغیر است، با میانگین ۸/۲ و انحراف معیار ۳/۱ که نشان‌دهنده تنوع هیدرولوژیکی منطقه است. نقشه فازی شده شاخص رطوبت توپوگرافی که با استفاده از تابع خطی افزایشی تهیه شده، نشان می‌دهد که ۲۹/۴٪ از مساحت حوضه دارای مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بالاتر از ۱۲ است و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با شاخص رطوبت توپوگرافی کمتر از ۶ که ۲۲/۷٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده شاخص رطوبت توپوگرافی و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸)، برابر با ۰/۸۱ محاسبه شد که ارتباط قوی بین تجمع آب و وقوع سیل را تأیید می‌کند. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق با تجمع بالای آب (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۱۰).

نقشه‌های ارائه شده که شاخص رطوبت توپوگرافی را به‌صورت خام و فازی شده نمایش می‌دهند، این الگو را تأیید می‌کنند. نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی از سبز روشن (شاخص رطوبت توپوگرافی کم: ۰/۴۶۷۳۹۵) تا سبز تیره (شاخص رطوبت توپوگرافی زیاد: ۱۸/۳۰۷۳۹۵)، توزیع شاخص را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۱۸۶۶) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۸۴۲۱)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس این معیار ارزیابی می‌کند. مناطق با شاخص رطوبت توپوگرافی بالا (مانند پلدختر و بخش‌هایی از خرم‌آباد) با

<sup>1</sup> Topographic Wetness Index (TWI)

رنگ قرمز در نقشه فازی شده، به عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، در حالی که نواحی با شاخص رطوبت توپوگرافی پایین (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۰).

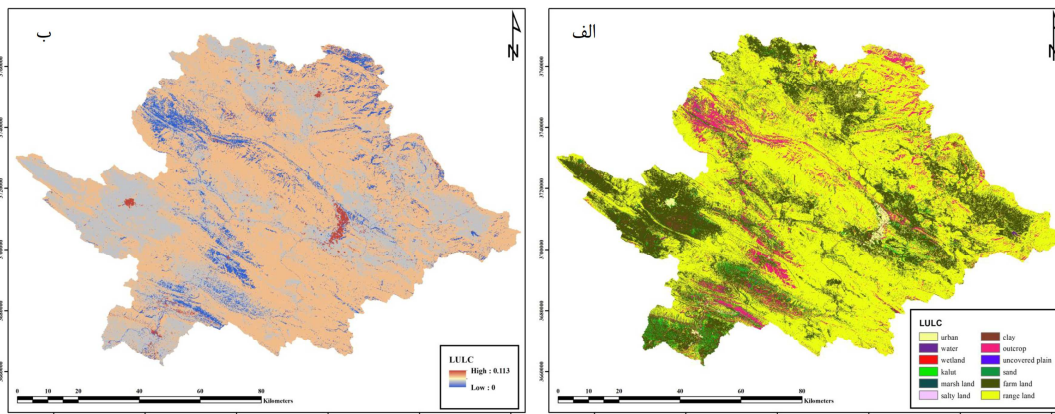


شکل ۱۰: نقشه‌های شاخص رطوبت توپوگرافی خام (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

### کاربری اراضی

کاربری اراضی و پوشش زمین به دلیل تأثیر بر نفوذ آب و رواناب سطحی، نقش مهمی در پهنه‌بندی خطر سیل دارند. مناطق شهری با سطوح نفوذناپذیر خطر سیل را افزایش می‌دهند، در حالی که جنگل‌ها و مراتع، به دلیل نفوذپذیری بالا، خطر را کاهش می‌دهند (Kazakis et al., 2015; Tha et al., 2012).

در این پژوهش از نقشه کاربری اراضی ایران شامل ۱۳ کلاس استفاده شده است (Ghorbanian et al., 2020). تحلیل داده‌ها نشان داد که مناطق شهری و دشت‌های بدون پوشش (۱۵/۸٪ مساحت حوضه کشکانرود) به دلیل نفوذپذیری پایین، پرخطر محسوب می‌شوند، در حالی که نواحی جنگلی و مرتعی (۴۲/۳٪) خطر کمتری دارند. ضریب همبستگی بین کاربری اراضی فازی شده و سیل تاریخی ۱۳۹۸ برابر ۰/۷۹ به دست آمد که با آسیب شدید مناطق شهری مانند پلدختر و خرم‌آباد در آن سیل مطابقت دارد. نقشه فازی شده نیز مناطق شهری و بدون پوشش را با رنگ قرمز (پرخطر) و نواحی جنگلی و مرتعی را با رنگ آبی (کم‌خطر) نشان داد. تحلیل ترکیبی نشان داد که خطر سیل در مناطق شهری با شیب کم و بارندگی زیاد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ۰/۸۶). این حال، تغییرات زمانی در کاربری اراضی می‌تواند بر دقت این نتایج تأثیر بگذارد (Tenzin & Bhaskar, 2020).



شکل ۱۱: نقشه‌های کاربری اراضی خام (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

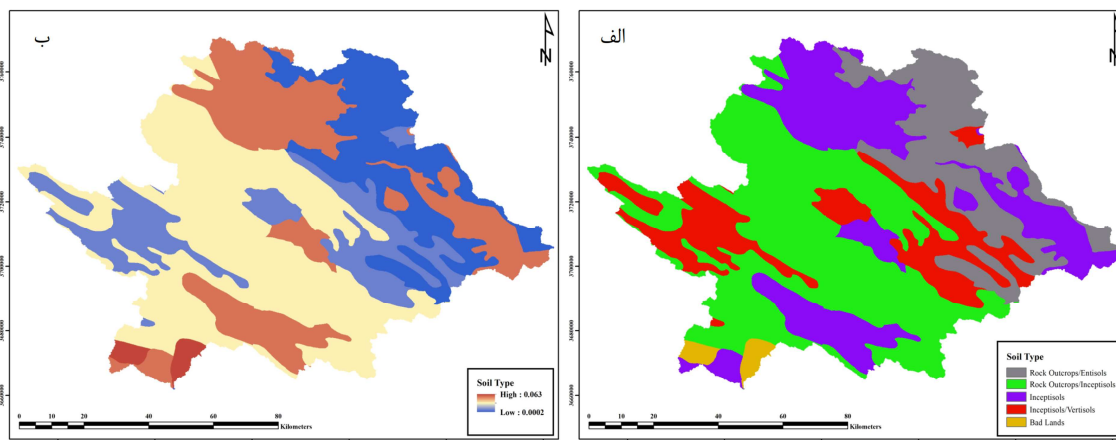
## نوع خاک

نوع خاک، یکی از عوامل کلیدی در تعیین خطر سیلاب است؛ زیرا بافت و ویژگی‌های فیزیک‌وشیمیایی خاک به‌طور مستقیم بر نرخ نفوذ آب و تولید رواناب سطحی تأثیر می‌گذارد (Ouma & Tateishi, 2014). خاک‌های با سنگ بیرون‌زده یا آنتی‌سول‌ها خطر سیلاب بسیار کم، اینسپتی‌سول‌ها یا ورتی‌سول‌ها خطر کم و سنگ‌های بیرون‌زده با اینسپتی‌سول‌ها خطر متوسط دارند. اینسپتی‌سول‌ها خطر زیاد و بدلندها خطر بسیار زیاد سیلاب دارند. خاک‌هایی با نفوذپذیری پایین مانند بدلندها، به‌دلیل ناتوانی در جذب آب، رواناب سطحی را افزایش داده و خطر سیل را تشدید می‌کنند، درحالی‌که خاک‌هایی با ظرفیت نگهداری آب بالا، مانند آنتی‌سول‌ها، این خطر را کاهش می‌دهند. این تفاوت‌ها، نقش مؤثر نوع خاک را در نداشتن خطر سیل برجسته می‌کند (Hartemink & Bockheim, 2017).

در حوضه کشکان‌رود، زمین‌های بایر (بدلندها) با پوشش گیاهی کم و نفوذپذیری پایین، ۲۸/۴٪ مساحت را تشکیل داده و به‌عنوان مناطق بسیار پرخطر سیل شناخته شدند. در مقابل، خاک‌های آنتی‌سول و برون‌زدهای سنگی/ آنتی‌سول با ۱۹/۶٪ مساحت، به‌دلیل ظرفیت نگهداری آب بالا، در دسته بسیار کم‌خطر قرار گرفتند. ضریب همبستگی ۰/۸۲ بین داده‌های فازی‌شده نوع خاک و سیلاب ۱۳۹۸، نشان‌دهنده ارتباط قوی این پارامتر با وقوع سیل است (شکل ۱۲).

نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی متنوع، توزیع پنج کلاس نوع خاک را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی‌شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۰۴۸۲) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۸۴۶۲)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس نفوذپذیری هر کلاس ارزیابی می‌کند. مناطق با خاک‌های بایر (مانند بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه، از جمله پلدختر) با رنگ قرمز در نقشه فازی‌شده، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، درحالی‌که نواحی با خاک‌های آنتی‌سول (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۲).

تحلیل تأثیرات متقابل نوع خاک با سایر پارامترها (مانند شیب و بارندگی) نشان داد که در مناطق با خاک‌های بایر، شیب کم و بارندگی بالا، خطر سیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ترکیبی ۰/۸۸). با این حال، این تحلیل با برخی محدودیت‌ها مواجه است. تغییرات فصلی در ویژگی‌های خاک، مانند افزایش غلظت سدیم و کلر در بدلندها طی فصل خشک، ممکن است بر نفوذپذیری و در نتیجه دقت نتایج اثر بگذارد (Ouma & Tateishi, 2014). همچنین، عدم در نظر گرفتن اثرات فرسایش خاک در مناطق بایر، می‌تواند بر ارزیابی خطر سیل تأثیر بگذارد.



شکل ۱۲: نقشه نوع خاک و نقشه باز طبقه‌بندی شده (الف) و فازی‌شده (ب) بر اساس پتانسیل سیل خیزی در حوضه کشکان‌رود

شاخص پوشش گیاهی نرمال شده<sup>۱</sup>

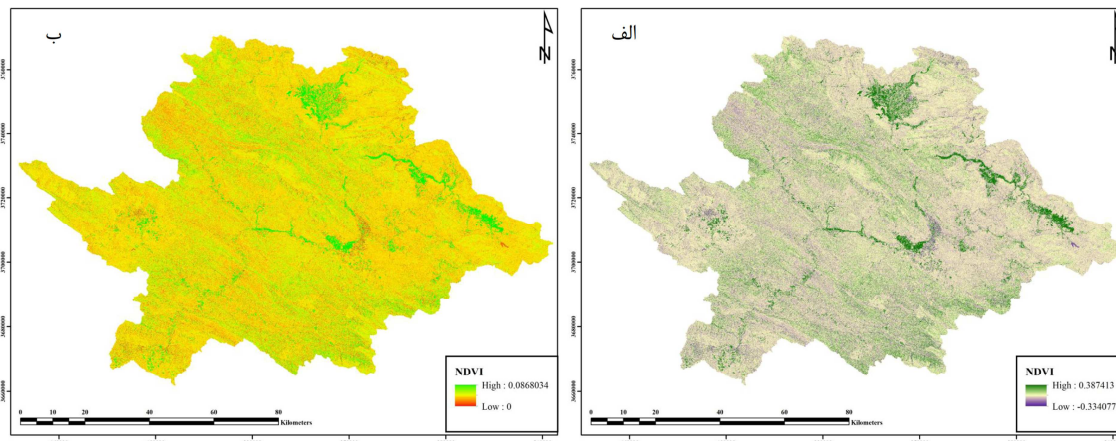
شاخص پوشش گیاهی با کاهش سرعت حرکت آب و افزایش نفوذ آن به خاک، نقش کلیدی در کاهش رواناب سطحی و شدت سیلاب ایفا می‌کند (Zhao et al., 2019). تبدیل مناطق با پوشش گیاهی متراکم به مناطق شهری یا بایر، با کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب، خطر سیل را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Vaghefi et al., 2019).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (۱۸)$$

که در آن  $\rho_{NIR}$  و  $\rho_{RED}$  به ترتیب مقادیر بازتاب سطحی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند. کلاس‌هایی با مقادیر کمتر از ۰/۴ و بیشتر از ۰/۱۱- به ترتیب کمتر آسیب‌پذیر و بیشتر مستعد سیلاب در نظر گرفته شدند. در نتیجه فازی‌سازی به وسیله تابع خطی کاهش می‌باشد.

در این مطالعه، مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در حوضه آبریز کشکانرود بین ۰/۱۱۲۷۳۷- تا ۰/۴۶۷۲۱۷ متغیر است، با میانگین ۰/۱۸ و انحراف معیار ۰/۰۹ که نشان‌دهنده تنوع پوشش گیاهی از مناطق کم‌تراکم (مانند دشت‌های بدون پوشش) تا نواحی با پوشش متراکم (مانند جنگل‌ها و مراتع) است. تحلیل نقشه فازی‌شده شاخص پوشش گیاهی نرمال شده نشان داد که ۳۵/۷٪ از مساحت حوضه دارای مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده کمتر از ۰/۱۱ است و به دلیل پوشش گیاهی کم و نفوذپذیری پایین، به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با شاخص پوشش گیاهی نرمال شده بیشتر از ۰/۴ که ۱۸/۹٪ از مساحت را شامل می‌شوند، به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و نفوذپذیری بیشتر، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی‌شده شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸) برابر با ۰/۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین کمبود پوشش گیاهی و وقوع سیل است. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق با پوشش گیاهی کم (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۱۳).  
نقشه خام پوشش گیاهی نرمال شده با طیف سبز تیره (مقدار بالا: ۰/۴۶۷۲۱۷) تا سبز روشن (مقدار پایین: ۰/۱۱)، توزیع پوشش گیاهی حوضه را نشان می‌دهد. نقشه فازی‌شده با طیف زرد (خطر کم: ۰) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۶۲)، نواحی مستعد سیل را بر اساس پوشش گیاهی برجسته می‌کند.

<sup>۱</sup> Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)



شکل ۱۳: نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی نرمال شده خام (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

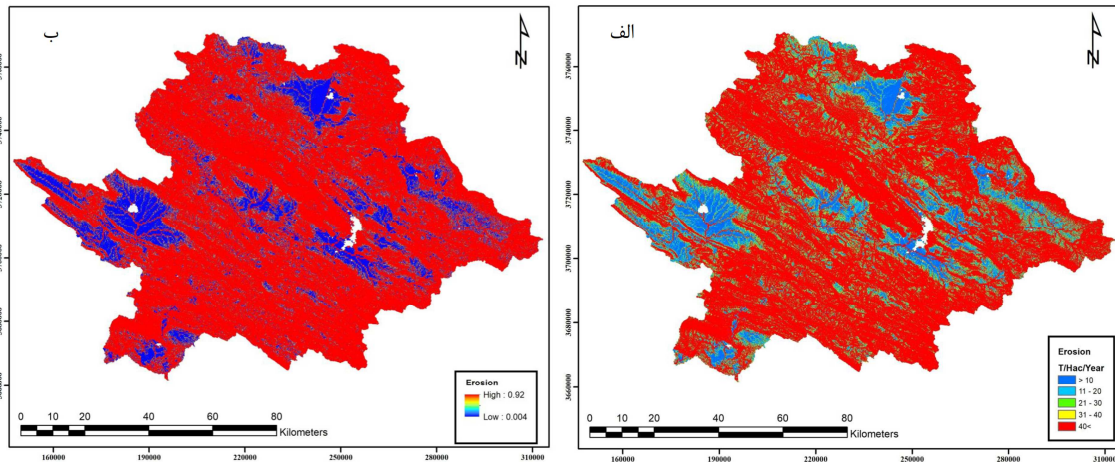
### نرخ فرسایش

نرخ فرسایش خاک با افزایش حجم رواناب در بارش‌های شدید، تأثیر مستقیمی بر احتمال وقوع سیل دارد. در این پژوهش، از معادله جهانی فرسایش خاک<sup>۱</sup> برای برآورد میزان سالانه از دست رفتن خاک استفاده شده است (Renata, 2020). داده‌های بانک خاک ایران بر اساس شدت فرسایش در کلاس‌های III تا VII طبقه‌بندی شده و سپس با به‌کارگیری تابع عضویت خطی افزایشی فازی، برای تحلیل بهتر به مقادیر [۰،۱] نگاشت شدند.

$$A = R \times K \times (L \times S) \times C \times P \quad (19)$$

در این معادله، A مقدار سالانه خاک از دست رفته (تن در سال)، R میانگین ماهانه شدت فرساینده‌گی بارندگی، K شاخص فرسایش‌پذیری خاک، L و S به ترتیب ضریب‌های مربوط به طول و شیب توپوگرافی، C عامل مدیریت پوشش گیاهی و P شاخص اقدامات حفاظتی خاک است. بررسی‌های علمی نشان داده‌اند که فرسایش نقش مهمی در تشدید سیلاب دارد. بسیاری از پژوهش‌ها مستقیماً نرخ فرسایش را به‌عنوان یک متغیر در تهیه نقشه‌های خطر سیلاب لحاظ نکرده‌اند و به‌جای آن از ویژگی‌هایی مانند نوع خاک و شاخص پوشش گیاهی استفاده کرده‌اند. اما این مطالعه به‌منظور افزایش دقت در شناسایی مناطق مستعد سیلاب، نرخ فرسایش خاک را به‌طور مستقیم در مدل‌سازی خود مورد استفاده قرار داده است (شکل ۱۲). خاک‌هایی که مستعد فرسایش هستند، نه‌تنها باعث افزایش حجم رواناب می‌شوند، بلکه با انتقال ذرات ریز و رسوبات به رودخانه‌ها، در طول زمان موجب انباشته شدن مواد در بستر و کناره‌های رودخانه و در نتیجه کاهش ظرفیت عبور جریان آب خواهند شد (Parsian et al., 2021).

<sup>1</sup> Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)



شکل ۱۴: نقشه طبقه‌بندی نوع خاک و نرخ فرسایش (الف) و فازی شده (ب) در حوضه آبریز کشکانرود

### بحث

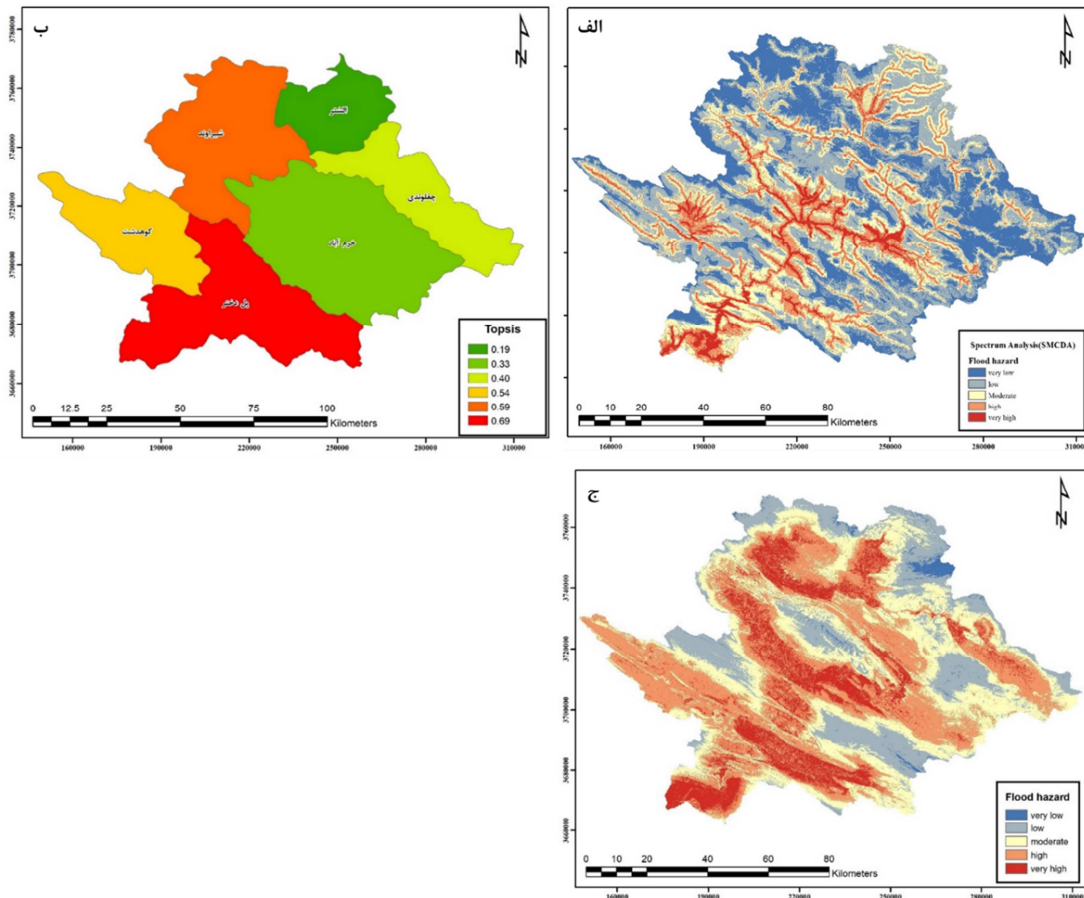
این پژوهش با استفاده از روش‌های چندمعیاره وزن‌دهی همپوشانی، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تاپسیس، خطر سیل را در حوضه کشکانرود بررسی کرده است. این روش‌ها با تلفیق معیارهای توپوگرافی، هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، نتایج دقیقی ارائه داده و تطابق بالایی با داده‌های سیل ۱۳۹۸ دارند. در این پژوهش تحلیل تطبیقی روش‌ها و نقاط قوت و ضعف هر کدام بررسی شده است. روش وزن‌دهی همپوشانی از طریق تخصیص وزن‌های نسبی به معیارها و روی هم‌گذاری وزن‌دار لایه‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی عمل می‌کند. این روش با فرض خطی بودن روابط میان معیارها، وزن هر پارامتر را بر اساس روشی غیر از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین کرده و نقشه نهایی خطر را تولید می‌کند. در این مطالعه، روش وزن‌دهی همپوشانی با ضریب همبستگی ۰/۸۷، توانایی قابل‌قبولی در شناسایی الگوهای کلی خطر سیل نشان داد (شکل ۱۵ الف). نقشه حاصل از این روش، مناطق جنوبی و مرکزی حوضه (پلدختر، خرم‌آباد و شیراوند) را به‌عنوان نواحی پرخطر (۷/۸٪) در پهنه بسیار پرخطر و (۲۷/۵٪) در پهنه پرخطر و مناطق شمالی (الشتر) را به‌عنوان نواحی کم‌خطر شناسایی کرد. این الگو با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که پلدختر را به‌عنوان یکی از مناطق به‌شدت آسیب‌دیده با دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و خسارت‌های ۲۶ میلیون دلاری گزارش کرده است، هم‌خوانی دارد. با این حال، روش وزن‌دهی همپوشانی به دلیل وابستگی به وزن‌دهی ثابت و عدم توانایی در مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ذاتی داده‌های محیطی، محدودیت‌هایی را نشان می‌دهد. این روش نمی‌تواند پیچیدگی‌های غیرخطی تعاملات میان معیارها (مانند تأثیر متقابل شیب و نوع خاک) را به‌طور کامل پوشش دهد. این محدودیت در مناطقی مانند کوه‌دشت که دارای خاک‌های بایر و مستعد فرسایش است، ممکن است به تخمین محافظه‌کارانه‌تر خطر منجر شده باشد (Fernández & Lutz, 2010).

روش تاپسیس که مبتنی بر مفاهیم راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی است (Hwang & Yoon, 1981)، از منظر رتبه‌بندی نسبی گزینه‌ها به پهنه‌بندی خطر سیل پرداخته است. این روش با محاسبه فاصله اقلیدسی هر پیکسل از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، نزدیکی نسبی را در بازه [۰،۱] تعیین می‌کند و گزینه‌های بهینه را بر اساس این معیار رتبه‌بندی می‌کند. در این پژوهش، تاپسیس با ضریب همبستگی ۰/۸۹، کارایی بالایی در شناسایی مناطق پرخطر نشان داد و ۸٪ از مساحت را در پهنه بسیار پرخطر قرار داد (شکل ۱۵-ب). نقشه تاپسیس که مقادیر CI را از ۰/۱۹

(کم خطر) تا ۰/۶۹ (بسیار پرخطر) نشان می‌دهد، مناطق پل‌دختر، خرم‌آباد و کوه‌دشت را به‌عنوان نواحی پرخطر و الشتر را به‌عنوان کم‌خطر شناسایی کرد. مزیت اصلی تاپسیس در مقایسه با روش وزن‌دهی همپوشانی، توانایی آن در ارائه رتبه‌بندی پویا و وابسته به مقادیر حدی معیارها است که به انعکاس تغییرات نسبی در شرایط محیطی کمک می‌کند (Pathan et al., 2022). به‌عنوان مثال، در مناطقی با شاخص رطوبت توپوگرافی بالا و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده پایین، این روش توانسته است با تعادل میان معیارها، پتانسیل سیل را به‌طور مؤثری ارزیابی کند. با این‌حال، وابستگی تاپسیس به انتخاب صحیح معیارهای مثبت و منفی و حساسیت آن به ناهمگنی داده‌ها، ممکن است در برخی موارد به نوسانات جزئی در نتایج منجر شود. این موضوع در مقایسه با تحلیل سلسله‌مراتبی که عدم قطعیت‌ها را به‌طور صریح مدل‌سازی می‌کند، به‌عنوان یک محدودیت نسبی مطرح است (Solaimani et al., 2023).

روش تحلیل سلسله‌مراتبی با بهره‌گیری از نظریه مجموعه‌های فازی (Zadeh, 1965)، رویکردی پیشرفته‌تر برای مدیریت عدم قطعیت‌ها ارائه می‌دهد. این روش با تبدیل داده‌های ورودی به مقادیر فازی در بازه [۰،۱] و استفاده از توابع عضویت خطی افزایشی برای پارامترهایی مانند بارندگی و شاخص رطوبت توپوگرافی و کاهش برای ارتفاع و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده، امکان مدل‌سازی پیوستگی و انعطاف‌پذیری بیشتری در تحلیل معیارها فراهم می‌کند. در این مطالعه، تحلیل سلسله‌مراتبی با ضریب همبستگی ۰/۹۲، دقیق‌ترین نتایج را ارائه داد و ۸/۲٪ از مساحت حوضه را در پهنه بسیار پرخطر و ۲۸/۱٪ را در پهنه پرخطر طبقه‌بندی کرد (شکل ۱۵ ج). این دقت بالا به توانایی روش در تلفیق اثرات غیرخطی و عدم قطعیت‌های مرتبط با پارامترهایی مانند نرخ فرسایش و شاخص رطوبت توپوگرافی نسبت داده می‌شود. به‌عنوان مثال، در مناطق جنوبی حوضه (پل‌دختر و خرم‌آباد) که با خاک‌های بایر (بدلندها)، بارندگی شدید و شیب کم مواجه هستند، تحلیل سلسله‌مراتبی با فازی‌سازی معیارها، حساسیت بالای این نواحی به سیل را به‌طور دقیق‌تری منعکس کرده است. این برتری نسبت به روش وزن‌دهی همپوشانی، به‌دلیل استفاده از رویکرد فازی در کاهش سوگیری‌های ناشی از وزن‌دهی ثابت و افزایش انطباق با واقعیت‌های محیطی است (Sepehri et al., 2020). با این حال، پیچیدگی محاسباتی این روش و نیاز به تنظیم دقیق توابع عضویت، ممکن است کاربرد آن را در شرایط کمبود داده یا منابع محاسباتی محدود کند.

تحلیل تطبیقی نتایج سه روش نشان می‌دهد که هر سه رویکرد، مناطق جنوبی و مرکزی حوضه (پل‌دختر، خرم‌آباد و شیراوند) را به‌عنوان نواحی پرخطر و مناطق شمالی (الشتر) را به‌عنوان نواحی کم‌خطر شناسایی کرده‌اند که با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ هم‌راستا است. با این حال، تفاوت‌های ظریف در درصد مساحت پهنه‌های پرخطر ۸/۲٪ در تحلیل سلسله‌مراتبی، ۸٪ در تاپسیس و ۷/۸٪ در روش وزن‌دهی همپوشانی (توزیع مکانی خطر)، نشان‌دهنده تأثیر ساختار ریاضی هر روش بر خروجی‌هاست. یکی از جنبه‌های نوآورانه این مطالعه، گنجاندن نرخ فرسایش به‌عنوان معیاری مستقل در کنار پارامترهای متداول مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده و شاخص رطوبت توپوگرافی است. استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک برای محاسبه فرسایش، تأثیر این عامل بر افزایش رواناب و کاهش ظرفیت بستر رودخانه‌ها را به خوبی نشان داده و دقت مدل‌سازی را در مناطق مستعد فرسایش (مانند کوه‌دشت) بهبود بخشیده است. این رویکرد که کمتر در مطالعات مشابه مورد توجه قرار گرفته، به‌عنوان یک مزیت رقابتی این پژوهش برجسته می‌شود و قابلیت تعمیم آن به سایر حوضه‌های کوهستانی با شرایط مشابه را تقویت می‌کند (Parsian et al., 2021).



شکل ۱۵: خطر سیل خیزی منطقه کشکانرود به روش وزن‌دهی همپوشانی (الف)، تاپسیس (ب) و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (ج)

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه کشکانرود، از سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل روش‌های وزن‌دهی همپوشانی، تاپسیس و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده کرده است. نتایج نشان داد که مناطق پلدختر، خرم‌آباد و کوه‌دشت به‌علت ارتفاع کم، شیب ملایم، بارش شدید، نزدیکی به رودخانه‌ها و خاک‌های نفوذناپذیر (زمین‌های بایر)، بالاترین خطر سیل را دارند، درحالی‌که نواحی شمالی مانند الشتر به‌دلیل شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی، کم‌خطر هستند. مقایسه نتایج با داده‌های سیل تاریخی ۱۳۹۸ با ضریب همبستگی ۰/۹ دقت بالای مدل ترکیبی را تأیید کرد. در بین روش‌ها، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی با ضریب همبستگی ۰/۹۲ بهترین عملکرد را داشت و ۸/۲٪ منطقه را بسیار پرخطر و ۱/۲۸٪ را پرخطر شناسایی کرد. روش تاپسیس نیز با ضریب همبستگی ۰/۸۹ عملکرد مطلوبی داشت، درحالی‌که روش وزن‌دهی همپوشانی (ضریب همبستگی ۰/۸۷) به‌دلیل عدم لحاظ عدم قطعیت‌های محیطی، دقت کمتری ارائه کرد. موفقیت تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ناشی از توانایی آن در مدیریت داده‌های پیچیده و ناهمگن بود.

## منابع

- غلامی، محمد؛ احمدی، مهدی. (۱۳۹۸). ریز پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر لامرد با استفاده از AHP، GIS و منطق فازی، مخاطرات محیط طبیعی، ۸ (۲۰)، ۱۱۴-۱۰۱. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.22505.1334>
- موسوی، سیده معصومه؛ نگهبان، سعید؛ رخشانی مقدم، حیدر؛ حسین زاده، سید محسن. (۱۳۹۵). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی با استفاده از منطق فازی TOPSIS در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر باغملک)، مخاطرات محیط طبیعی، ۵ (۱۰)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2960>
- میرموسوی، سیدحسین؛ اسمعیلی، حسین. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی نواحی سیل‌خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش‌ازدور (RS)، مطالعه موردی: شهرستان داراب. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰ (۲۷)، ۴۶-۲۱. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32986>
- اسماعیل، نجفی؛ کریمی کردآبادی، مرتضی. (۱۳۹۹). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل ترکیبی AHP-FUZZY با تأکید بر امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹ (۲)، ۴۳-۶۰. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.86110>
- زیاری، کرامت اله؛ رجایی، سیدعباس؛ داراب خانی، رسول. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی ظرفیت سیل‌خیزی با استفاده از تحلیل سلسه‌مراتبی و منطق فازی در محیط GIS نمونه موردی: شهر ایلام. مدیریت بحران ۱۰ (۱)، ۳۰-۲۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2>
- قیصری، حدیثه؛ احدنژاد، محسن؛ آهار، حسن. (۱۳۹۴). مکان‌یابی فضاهای شهری چندمنظوره ایمن در مواقع بروز بحران با به‌کارگیری روش شاخص همپوشانی وزنی (نمونه موردی: بافت قدیم شهر کرمانشاه). امداد و نجات، ۷ (۱)، ۳۵-۵. <https://sid.ir/paper/190769/fa>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Chen, H. W., & Chang, N. B. (2010). Using fuzzy operators to address the complexity in decision-making of water resources redistribution in two neighbouring river basins. *Advances in water resources*, 33(6), 652-666. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.03.007>
- Duchemin, M., & Hogue, R. (2009). Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1-2), 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.10.005>
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S., & Duan, Z. (2022). Performance evaluation of six gridded precipitation products throughout Iran using ground observations over the last two decades (2000-2020). *Remote Sensing*, 14(15), 3783. <https://doi.org/10.3390/rs14153783>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2012). Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 33(3-4), 531-555. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9165-2>
- Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2017). *Anthrosols and Technosols*. In *The Soils of the USA* (pp. 173-187). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4_11)
- Hooijer, A., Klijn, F., Pedroli, G. B. M., & van Os, A. G. (2004). Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Research and Applications*, 20(3), 343-357. <https://doi.org/10.1002/rra.781>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A., Zhao, W., & Liu, Y. (2019). Flood-risk zoning based on analytic hierarchy process and fuzzy variable set theory. *Natural Hazards Review*, 20(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.00003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.00003)
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on a GIS-based hybrid multi-criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, 572, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>
- Kazakis, N., Kougiass, 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>
- Kay, A. L., Jones, R. G., & Reynard, N. S. (2006). RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.012>
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural hazards*, 63, 737-760. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0180-y>
- Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>

- Malik, S., Pal, S. C., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., & Das, B. (2020). Prediction of highly flood-prone areas by GIS-based heuristic and statistical model in a monsoon-dominated region of the Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>
- Mikhailov, L. (2003). Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, 134(3), 365–385. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00383-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00383-4)
- Kulimushi, L. C., Choudhari, P., Maniragaba, A., Elbeltagi, A., Mugabowindekwe, M., Rwanyiziri, G., and Singh, S. K. (2021). Erosion risk assessment through prioritization of sub-watersheds in Nyabarongo river catchment, Rwanda. *Environmental Challenges*, 5, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100260>
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- 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. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Pathan, S., Pradhan, B., & Alamri, A. (2022). Flood susceptibility mapping using geospatial-based TOPSIS and frequency ratio models: A case study of the Thamirabarani River basin, India. *Geocarto International*, 37(10), 2694–2721. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1844300>
- Parsian, S., Amani, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., & Mahdavi, S. (2021). Flood hazard mapping using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and multi-source geospatial datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4761. <https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- Pourali, S.H., Arrowsmith, C., Chrisman, N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning. *Appl. Spatial Analysis* 9, 39–54 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2015). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000–1017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- Rao, R. V. (2007). Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods (Vol. 2, p. 294). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-819-7>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073–1076.
- Saaty, T. L. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sepehri M, Malekinezhad H, Hosseini SZ, Ildoromi AR (2019). Assessment of flood hazard mapping in urban areas using the entropy weighting method: a case study in Hamadan city, Iran. *Acta Geophys* 67(5):1435–1449 <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00342-x>
- Sepehri M, Malekinezhad H, Hosseini SZ, Ildoromi AR (2020). Suburban flood hazard mapping in Hamadan city, Iran. Paper presented at the proceedings of the Institution of Civil Municipal Engineers <https://doi.org/10.1680/jmuen.17.00029>
- Solaimani, K., Bararkhanpour, S. Spatiotemporal changes of climatic parameters, extreme quantiles and their role on evaporation in N. Iran (Golestan province). *Arab J Geosci* 15, 68 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09300-8>
- Sowissi, A., Hassoune, M., El Machkouri, M., & El Ghachtoul, Y. (2020). Flood susceptibility mapping using GIS and analytical hierarchy process (AHP): A case study in Oued Laou Basin (Northern Morocco). *International Journal of River Basin Management*, 18(4), 529–540. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1598306>
- Sun, H., Yu, Q., Wang, X., Zhang, X., & Ruan, X. (2024). Exploring sustainable watershed flood risks management: An innovative TFAHP-TOPSIS methodology in the Georges River Basin, Australia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104626. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104626>
- Tenzin, J., & Bhaskar, A. S. (2020). Flash flood Hazard zone mapping using GIS: Sarpang. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 13(1), 7-20.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., Peng, L., & Yang, L. (2019). Flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks. *Journal of Hydrology*, 575, 1152–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.003>
- Wang, G., Liu, Y., Hu, Z., Lyu, Y., Zhang, G., Liu, J., & Zheng, H. (2020). Flood risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China. *Sustainability*, 12(4), 1-30. <https://doi.org/10.3390/su12041451>
- Yamani, M., & Enayati, M. (2006). The Analyses Of Flood Data In Relation To The Geomorphologic Specification Of Fashand And Behjatahad Basins. *Geographical Research Quarterly*, 37(54), 4-4. Sid. <https://sid.ir/paper/538814/en>
- Yodying, A., Seejata, K., Chatsudarat, S., Chidburee, P., Mahavik, N., Kongmuang, C., & Tantane, S. (2019, October). Flood hazard assessment using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Bang Rakam model in Thailand. In *Proceedings of the 40th Asian Conference on Remote Sensing, Daejeon Convention Center (DCC), Daejeon, KR* (pp. 14-18).
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2019). Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of the Total Environment*, 615, 1133–1142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.232>.