Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Winter 2026, Vol. 15(4): 64 - 86

Research Article

Evaluation and zoning of flood risk using decision-level fusion of AHP and FuzzyAHP methods (Case study: Khuzestan Province)

Sajad Zareie[1]*, Fateme Ghazalizadeh[1]

1- Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: *AHP, Fuzzy AHP, Khuzestan Province, Flood risk, Fusion.*

1- Introduction

Numerous studies in recent years have been conducted in the field of flood risk zoning by combining spatial multi-criteria analysis techniques and GIS, yielding reliable results for making crucial management decisions to protect natural and human resources in various regions. Ganji et al. (2022) created a flood vulnerability rate map and then developed a flood risk zoning map for the area using a set of vulnerability criteria weighted by two methods: the Analytic Hierarchy Process (AHP) and triangular fuzzy numbers (TFN). Finally, they compared each generated map with the flood vulnerability rate map; the results showed a difference of 6.55% between the flood vulnerability map and the AHP map, and 2.33% for the TFN-AHP map (Ganji et al., 2022). Nguyen et al. (2024) performed data analysis and weighting to model flood risk for UNESCO World Heritage Sites, utilizing the fuzzy analytic hierarchy process to determine the weight of each indicator, rank the layers, and ascertain flood risks. A comparison of research results with historical flood maps revealed that over 75% of past floods occurred in areas predicted by the model as high or very high risk (Nguyen et al., 2024). Saha et al. (2020) calculated the extent of past floods and the land use/land cover (LULC) classes affected by flooding using GIS and remote sensing techniques. For this purpose, parameters influencing flooding—such as drainage density, elevation, land use, roughness, slope, etc.—were employed, and AHP method was used to generate a flood risk map (Saha et al., 2020). Given that Khuzestan province has experienced flood disasters in recent years (2018 and 2019) and remains susceptible to future flooding, the importance and necessity of this research are more evident than ever. The present study aims to utilize the Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Logic (FuzzyAHP), and a fusion of the two methods to achieve a more accurate and comprehensive assessment of flood risks in Khuzestan province.

2- Materials and Methods

Ten natural indices were employed to conduct this study: distance to waterways, distance to roads, average precipitation over a five-year period for Khuzestan Province, topographic wetness index, vegetation density index, drainage density, soil permeability, land use, slope, and elevation. Each index was analyzed and assigned weights using both the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP methods. AHP weighting was performed in IDRISI software, and consistency of the indices was calculated. Fuzzy AHP weighting was computed in Excel using specified formulas. To fuse the results of two methods, Independent Component Analysis (ICA) was initially applied to the flood hazard zoning maps generated by both AHP and FAHP to extract desired features or the strengths of each method. Subsequently, the resulting outputs were reclassified using Support Vector Machine (SVM) algorithm. Finally, to make a final decision

* Corresponding author: s.zareie2018@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2026.50837.2540
Received: 2025-10-12
Accepted: 2026-01-23

ISSN: 2717-0764

regarding data fusion, Fuzzy integral with the OR operator was utilized. This function determines the maximum value in each data set as the output.

3- Results and Discussion

By observing and assessing the zoning maps obtained from the mentioned methods, it was determined that the northeastern areas of Khuzestan Province are in low and very low risk class due to their high altitudes and steep slopes, although precipitation is relatively high in these areas. The central and northwestern regions of Khuzestan Province have average to low precipitation, which is often sudden and intense, sometimes causing river flooding. Also, relatively low slopes and high topographic humidity are in high and very high-risk classes. Also, the southern areas of the province were classified as high and very high risk due to their proximity to the Persian Gulf, low elevations, low slopes, and heavy rainfall. By considering these classifications and identifying flood-prone areas, it is possible to manage the severity and damage caused by the floods in these areas and prevent their devastation. The results indicated that both AHP and Fuzzy AHP methods classified the highest percentage of areas as high-risk (29% for AHP and 31% for Fuzzy AHP). However, the fusion of two methods led to a decrease in percentage of low-risk and very low-risk classes, while increasing the percentage of high-risk class to 40%, which is a critical class in terms of flood susceptibility. Furthermore, by comparing the hazard maps produced by each method with the actual flood events of 2019-2020 in Khuzestan province, it was found that only 59% of the selected points in AHP map and 65% in Fuzzy AHP map fell within high-risk zone. However, the fused method map accurately identified 70% of the selected points as high-risk, demonstrating its superior performance compared to the individual methods.

4- Conclusion

In this study, flood risk zoning maps were prepared by using ten natural indicators effective in flood occurrence and weighting them with AHP and Fuzzy AHP multi-criteria decision-making methods. Also, a new fusion-based method has been adopted at decision level to integrate the results of zoning maps with two AHP and Fuzzy AHP methods in order to achieve better results by utilizing the strengths of both methods. The results of flood risk zoning in the region showed that in both AHP and Fuzzy AHP methods, the largest area and percentage belong to the high-risk class. However, in the zoning map resulted by fusion of two methods, the largest area and percentage belong to the very high-risk class. But in the zoning map resulting from fusion of two methods, the largest area and percentage belong to very high-risk class. It has also been determined that in addition to natural factors such as sudden and heavy rainfall, non-natural factors like municipal sewage systems, municipal performance following rainfall, and urban drainage systems are highly influential in the occurrence and flow of floods. Therefore, to prevent and predict the risk of floods, these factors must be considered, and appropriate decisions must be made to mitigate casualties and financial losses caused by flooding.

5- References

Ganji, K., Gharechelou, S., Ahmadi, A., Alan Johnson, B., 2022. Riverine Flood Vulnerability Assessment and Zoning Using Geospatial Data and MCDA Method in Aq'Qala. International Journal of Disaster Risk Reduction 82, 103-345. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103345

Nguyen, D., Do, T., Van Nghiem, S., Ghimire, J., Dang, K., Giang, V., Vu, K., Pham, V., 2024. Flood Inundation Assessment of UNESCO World Heritage Sites Using Remote Sensing and Spatial Metrics in Hoi An City, Vietnam. Ecological Informatics 79, 102-427. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102427

Saha, A., Agrawal, S., 2020. Mapping and Assessment of Flood Risk in Prayagraj District, India: A GIS and Remote Sensing Study. Nanotechnology for Environmental Engineering 5, 1-18. https://doi.org/10.1007/s41204-020-00073-1

ISSN: 2717-0764

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Zareie, S., Ghazalizadeh, F., 2026. Evaluation and zoning of flood risk using decision-level fusion of AHP and FuzzyAHP methods (Case study: Khuzestan Province). Adv. Appl. Geol. 15 (4), 64-86.
DOI: 10.22055/aag.2026.50837.2540
https://aag.scu.ac.ir/article_20526.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با تلفیق در سطح تصمیم روش‌های AHP و FuzzyAHP (مطالعه موردی: استان خوزستان)

سجاد زارعی

گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

فاطمه غزلی زاده

گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

s.zareie@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۳

چکیده

علم سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در شناسایی نواحی تحت تأثیر سیل و به حداقل رساندن خسارات بسیار کارآمد بوده است. این پژوهش با هدف شناسایی مناطق مستعد سیل در استان خوزستان و کاهش خسارات ناشی از آن انجام شد. پهنه‌بندی خطر سیل با روش‌های AHP و FuzzyAHP انجام شد. نوآوری این پژوهش، فیوژن در سطح تصمیم دو روش مذکور جهت استفاده از نقاط قوت آنها است. برای انجام این کار شاخص‌های فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از راه‌ها، میانگین بارش طی یک دوره ۵ ساله، رطوبت توپوگرافی، NDVI، تراکم زهکشی، میزان نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی، شیب و ارتفاع استفاده شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که در هر دو روش AHP و FuzzyAHP بیشترین درصد کلاس، مربوط به کلاس پرخطر (AHP، ۲۹٪ و FuzzyAHP، ۳۱٪) است. اما نتایج حاصل از فیوژن دو روش طوری عمل کرده که از درصد کلاس‌هایی با خطر کم و بی‌خطر کم شده و به درصد کلاس پرخطر (۴۰ درصد) که کلاس دارای اهمیت در میزان خطرپذیری سیلاب است افزوده شود. همچنین با مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی هر کدام از روش‌ها با نقشه سیل سال ۹۹-۹۸ استان خوزستان مشخص شد که در نقشه پهنه‌بندی حاصل از روش AHP تنها ۵۹ درصد نقاط انتخابی و در روش FuzzyAHP، ۶۵ درصد نقاط انتخابی در محدوده پرخطر واقع شدند، اما در نقشه پهنه‌بندی حاصل از فیوژن دو روش ۷۰ درصد نقاط انتخابی در محدوده پرخطر واقع شدند که این امر نشان دهنده برتری فیوژن دو روش نسبت به هر کدام از روش‌ها به تنهایی است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مدیریت بحران، برنامه‌ریزی شهری، تعیین اولویت عملیات لایروبی و تقویت سازه‌های حفاظتی رودخانه‌ها در استان خوزستان مورد استفاده قرار گیرد و به عنوان ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی و کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: *AHP، FuzzyAHP ، استان خوزستان، خطر سیلاب، فیوژن*

۱-مقدمه

سیل یک حادثه طبیعی می‌باشد که در اثر افزایش سطح آب رودخانه‌ها به دلیل رگبارهای شدید یا بارش‌های آرام رخ می‌دهد. احتمال وقوع سیل تابع عوامل متعددی از جمله شدت بارش در هر منطقه، نفوذپذیری خاک آن، نقشه توپوگرافی و وضعیت زمین‌شناسی در منطقه موردنظر است. با بررسی و مطالعه تعداد سیل‌ها و شدت خسارات وارده در اثر سیلاب در یک منطقه تا حدودی می‌توان از ویرانگری آن جلوگیری کرد، اما راهی برای کنترل کامل این پدیده وجود ندارد. امروزه علم سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در مرحله شناسایی نواحی تحت تأثیر سیل، محاسبه تغییرات آب و شناسایی مسیرهای دقیق رواناب بسیار مفید واقع شده‌اند. نتایج اینگونه پژوهش‌ها به مسئولان و متخصصین امکان برنامه‌ریزی مناسبی جهت مدیریت بهتر و به حداقل رساندن خسارات وارده را می‌دهد. پژوهش‌های متعددی در سالیان اخیر در حوزه پهنه‌بندی خطرپذیری سیل با استفاده از ترکیب تکنیک‌های تحلیل چندمعیاره مکانی و GIS انجام شده است که نتایج قابل اطمینانی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی مهم در جهت حفظ منابع طبیعی و انسانی مناطق مختلف داشته‌اند.

Gholizadeh و همکاران (۲۰۱۷) پهنه‌بندی خطر سیل در حوزه زنگمار شهرستان باکو را با استفاده از روش فازی انجام دادند. در این تحقیق از لایه‌های اطلاعاتی از جمله شیب، انحنای پروفیل و پلانی متریک، نقشه بارش و... استفاده شد که نتایج

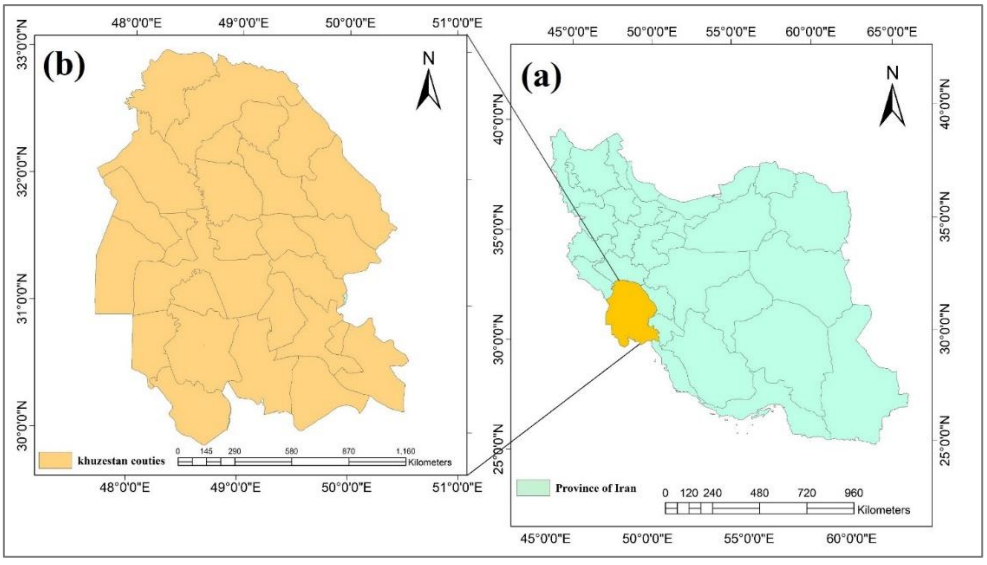
نشان داد اغلب نواحی با خطر سیل خیزی بسیار بالا در دامنه‌های محدب و ستیغ‌ها و در شیب بین ۰-۷ درصد که اغلب مناطق کوهستانی هستند قرار دارد (Gholizadeh et al., 2017). Abedini و Beheshti Javid (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی و ۱۰ پارامتر طبیعی و انسانی، حوضه رودخانه لیقوان چای از نظر پتانسیل سیل خیزی مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از این کار نشان داد که در بخش‌های پایینی حوضه و در زمین‌های پست و کم‌شیب به دلیل شیب کم و عمق زیاد رسوبات و مواد نفوذپذیر قدرت رواناب کم است (Abedini and Beheshti Javid, 2016). Amiri و همکاران (۲۰۱۸) به اولویت‌بندی مکانی سیل خیزی زیرحوضه‌های آبخیز مهارلو با استفاده از پارامترهای مورفومتریک و مدل تصمیم گیری VIKOR پرداختند که به این منظور از ۱۳ پارامتر استفاده شد. همچنین برای وزن‌دهی پارامترهای مورد استفاده تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی بکار گرفته شد. در نهایت نتایج ۵۳ زیرحوضه آبخیز مهارلو رتبه‌بندی شد (Amiri et al., 2018). Sharifi Pichoun و Parnoun (۲۰۱۸) با استفاده از پارامترهای شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، لیتولوژی و... در چارچوب منطق فازی تحلیل سیل گیری رودخانه قره‌سو را انجام دادند که نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که کمترین میزان سیل گیری در ارتفاعات و در نواحی با شیب بیشتر و جایی که فاصله بیشتری از مسیر رودخانه دارد دیده می‌شود (Sharifi Pichoun and Parnoun, 2018). Taherizadeh و همکاران (۲۰۲۳) ارزیابی مناطق مستعد سیل را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM) پیشنهاد کردند. در این تحقیق از چهارده معیار استفاده شد و در مناطقی که اطلاعات رسمی وجود نداشت پرسشنامه تهیه و روابط بین معیارها با استفاده از روش DEMATEL تجزیه و تحلیل و وزن آنها با استفاده از روش تحلیل شبکه (ANP) تعیین شد. نتایج نشان داد که توپوگرافی و سپس نوع سطح و پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر خطر سیل داشته‌اند (Taherizadeh et al., 2023). Ganji و همکاران (۲۰۲۲) نقشه نرخ آسیب پذیری سیل مربوط به شهرستان آق‌قلا را تهیه کردند سپس با استفاده از یک سری معیارهای آسیب پذیری و وزن دهی با دو روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و عدد فازی مثلثی نقشه پهنه‌بندی خطر سیل در منطقه را ایجاد کردند. در نهایت هر کدام از نقشه‌های تهیه شده را با نقشه نرخ آسیب پذیری سیل مقایسه کردند که طبق نتایج، تفاوت بین نقشه آسیب پذیری سیل و نقشه AHP (۶.۵۵٪) و TFN-AHP (۲.۳۳٪) است (Ganji et al., 2022). Nguyen و همکاران (۲۰۲۴) در سه مرحله تجزیه و تحلیل داده‌ها و وزن دهی آنها را انجام دادند تا خطر سیل را برای سایت‌های میراث جهانی سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی یونسکو مدل کنند و از روش تحلیل سلسه‌مراتبی فازی برای تعیین وزن هر شاخص و رتبه‌بندی لایه‌ها و تعیین خطرات سیل برای سایت‌های میراث جهانی یونسکو در شهر هوی و مناطق اطراف آن استفاده شد. در نهایت از مقایسه نتایج حاصل از تحقیق با نقشه سیل‌های تاریخی مشخص شد که بیش از ۷۵ درصد سیل‌های گذشته در مناطق پرخطر یا بسیار پرخطر پیش بینی شده توسط مدل رخ داده‌اند (Nguyen et al., 2024). Istak و همکاران (۲۰۲۴) شناسایی مناطق خطر سیل در امتداد مسیر پایین رودخانه Dhalai در ایالت Triqura را با استفاده از داده‌های سنجش از دوری و سیستم اطلاعات جغرافیایی با فرایند تحلیل سلسه‌مراتبی (AHP) انجام دادند. نتایج نشان داد در مناطقی که غلظت زمین‌های کشاورزی و سکونتگاه‌ها زیاد است بیشترین خطر را در برابر سیل دارند (Istak et al., 2022). Chen و همکاران (۲۰۲۱) شش مدل یادگیری ماشین را برای ارزیابی ریسک سیل در دلتای رودخانه پرل مورد استفاده قرار دادند که در میان آن‌ها، مدل‌های درخت تصمیم تقویت گرادیان (GBDT)، تقویت گرادیان شدید (XGBoost) و شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) برای اولین بار در این حوزه به کار گرفته شدند. برای این کار دوازده شاخص انتخاب و ۲۰۰۰ نقطه نمونه برای آموزش و آزمایش مدل‌ها ایجاد شد که نتایج نشان داد مدل GBDT بهترین عملکرد را داشته و معقول‌ترین نتیجه ریسک سیل را در بین شش مدل ارائه می‌دهد (Chen et al., 2021). Chen (۲۰۲۲) یازده عامل شرطی خطر سیلاب را به عنوان معیارهای ارزیابی انتخاب و با ادغام سه تکنیک تحلیل چند معیاره (MCA) از جمله فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، تکنیک ترتیب ترجیح بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS) و میانگین وزنی مرتب شده (OWA) به پهنه‌بندی خطر سیلاب پرداخت. کاربرد این چهارچوب در حوضه رودخانه دادو در چین منجر به تهیه مجموعه‌ای از یازده نقشه خطر سیلاب در سراسر حوضه گردید. نتایج نشان داد که

الگوهای توزیع کلاس‌های خطر در نقشه‌های AHP، TOPSIS و OWA ($\alpha = 1$) مشابه هستند و شهرستان‌های لودینگ و یوئکسی و مناطق مجاور آن‌ها به عنوان مناطق با بالاترین خطر شناسایی شدند که در شرایط محدودیت منابع باید در اولویت توجه قرار گیرند (Chen, 2022). Saha و همکاران (۲۰۲۰) به محاسبه میزان سیلاب‌های گذشته و کلاس‌های کاربری اراضی (LULC) تحت تأثیر سیلاب با استفاده از تکنیک‌های GIS و سنجش از دور در منطقه پرایاگرج هند پرداختند. برای اینکار پارامترهای مؤثر بر سیلاب شامل تراکم زهکشی، ارتفاع، کاربری اراضی، زبری، شیب و ... بکارگرفته شدند. و برای تولید نقشه ریسک سیلاب از روش AHP استفاده کردند (Saha et al., 2020).

با وجود مطالعات متعدد پهنه‌بندی خطر سیل، اکثر تحقیقات محدود به بررسی یک روش خاص، مانند AHP یا FuzzyAHP بوده‌اند. از نوآوری‌های این پژوهش مقایسه و ادغام این روش‌ها برای افزایش دقت ارزیابی می‌باشد و علاوه بر این، تطابق نتایج مدل‌ها با سیلاب‌های تاریخی می‌باشد. همچنین در پژوهش‌های گذشته تحلیل جامع پارامترهای طبیعی و انسانی به صورت یکپارچه انجام نشده است. لازم به ذکر است که، با توجه به وقوع سیلاب‌های شدید در استان خوزستان در سال‌های اخیر، پژوهش‌های محلی جامع با استفاده از تلفیق روش‌های AHP و FuzzyAHP هنوز انجام نشده است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقیق‌تر خطر سیل در استان خوزستان با تلفیق AHP و FuzzyAHP و تطبیق نتایج با داده‌های واقعی، این شکاف علمی را پر می‌کند.

۲-منطقه مورد مطالعه

با توجه به اهمیت جنبه اقتصادی در استان خوزستان و شرایط خاص اقلیمی این استان که وضعیت ویژه‌ای برای خاک، پوشش گیاهی و منابع آبی منطقه به وجود آورده است، به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. این استان با مساحت ۶۴۰۰۰ کیلومترمربع در جنوب غربی ایران در بازه طول جغرافیایی شرقی ۴۲ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه، و همچنین بین عرض جغرافیایی ۲۹ درجه ۵۸ تا ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). وضعیت آب و هوایی استان به سبب موقعیت جغرافیایی آن، گرم و خشک است. تابستان‌های این منطقه بسیار گرم بوده و دمای هوا در این فصل به بیش از ۵۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد و عمده بارش‌ها در ایام زمستان، بهار و پاییز اتفاق می‌افتد. این استان همچنین از طریق رودخانه کارون که از نقطه عبور اصلی آب در کشور است، به خلیج فارس منتهی می‌شود. به دلیل حرارت بالا و تبخیر زیاد، خوزستان یکی از استان‌هایی است که ممکن است با مشکلات خشکسالی و تنش‌های آبی مواجه شود. همچنین بارندگی‌های ناگهانی در این استان ممکن است منجر به سیلاب‌های ناگهانی شود.

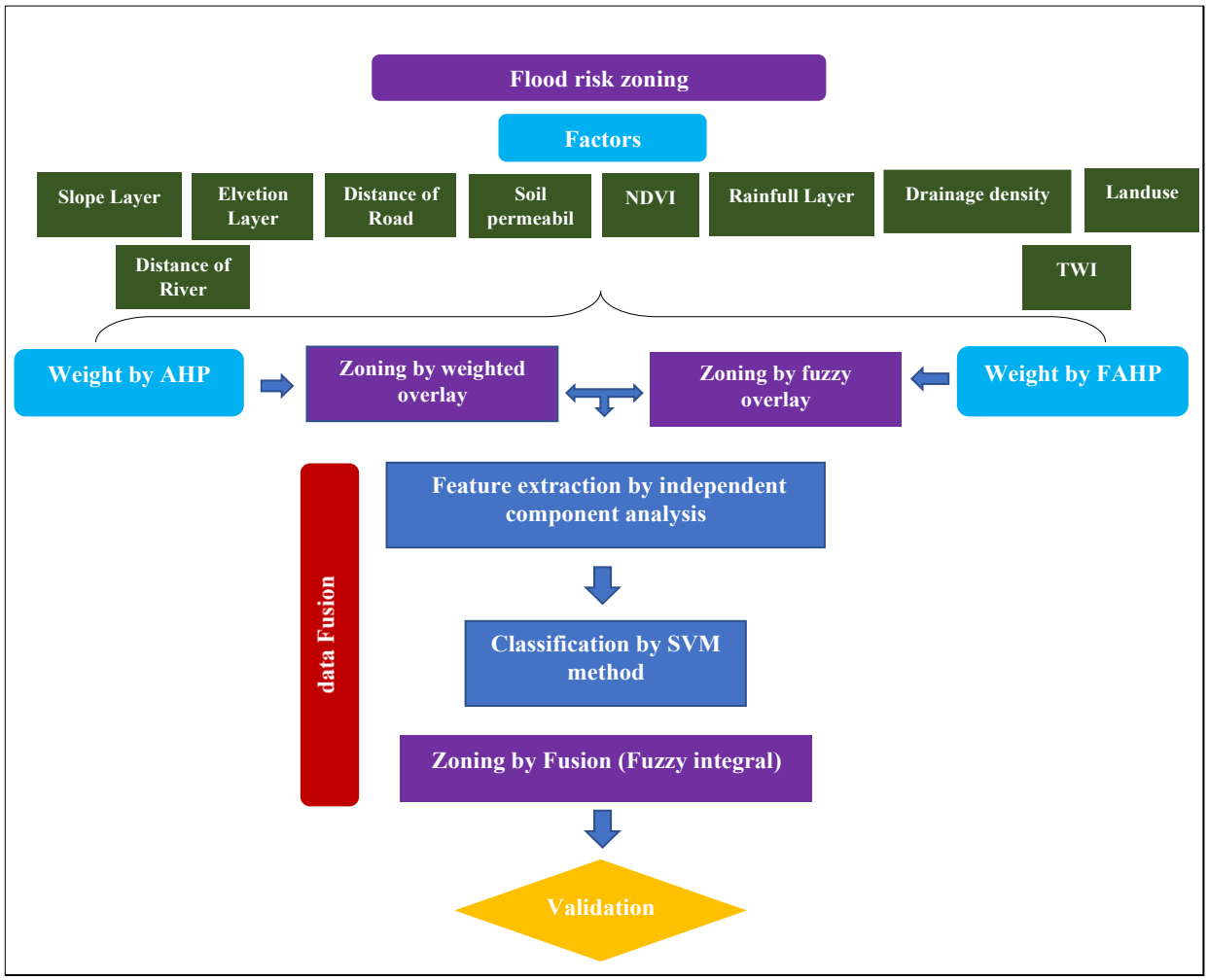


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. (a) کشور ایران، و (b) استان خوزستان.

Fig. 1. Geographical location of the study area. (a) Iran country, and (b) Khuzestan province.

۳-مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش، توصیفی_تحلیلی است. در این تحقیق ابتدا معیارهای مؤثر در پهنه‌بندی و ارزیابی خطر سیل از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و با نظر کارشناسان شناسایی شدند که این معیارها شامل فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص تراکم پوشش گیاهی، کاربری ارضی، تراکم زهکشی، نفوذپذیری خاک، شیب و ارتفاع است. آماده‌سازی تمامی این معیارها در نرم‌افزار Arcmap10.8 انجام شد. سپس از طریق مقایسات زوجی و تهیه پرسشنامه برای استفاده از نظر کارشناسان، با استفاده از دو روش منطق فازی (FuzzyAHP) و تحلیل سلسه‌مراتبی (AHP) وزن هرکدام از معیارها و زیر معیارها مشخص و وزن دهی به معیارها و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی انجام گردید. در این تحقیق سعی شده است روشی بر پایه فیوژن روش‌های AHP و FuzzyAHP ارائه شود و در نهایت نتایج حاصل از این روش برای بهبود نتایج پهنه‌بندی انجام شود و برای صحت سنجی روش پیشنهادی مقایسه نقشه پهنه‌بندی خطر سیل حاصل از هر کدام از روش‌ها و فیوژن دو روش با نقشه سیل ۱۳۹۸-۱۳۹۷ استان خوزستان انجام شد. مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- فلوچارت روش تحقیق.

Fig. 2. Flowchart of the research methodology.

۳-۱- فاکتورهای مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): این شاخص می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب به صورت کمی بیان کند (شکل ۳). این شاخص تابعی از شیب و مساحت بالادست است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$TWI = \ln\ [CA/Slope] \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در این رابطه CA منطقه‌ای است که با یک شبکه تخلیه می‌شود و Slope شیب محل برای تخمین زاویه هیدرولیک می‌باشد (Yousefzadeh et al., 2019). در این تحقیق برای بدست آوردن این شاخص از DEM بادقت ۳۰ متر منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار Arcmap 10.8 استفاده شد.

تراکم زهکشی: تراکم زهکشی یک شاخص مهم هیدروژئولوژی است که در یک حوزه می‌تواند نشان دهنده شدت و ضعف رواناب و فرسایش در قسمت‌های مختلف آن حوزه باشد (Jokar Sarhangi et al., 2019). این شاخص از تقسیم طول کل شبکه هیدروگرافی شامل آبراهه‌ها و رودخانه‌های فرعی به مساحت کل حوزه بدست می‌آید. برای بدست آوردن این پارامتر از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با دقت ۳۰ متر استفاده شد (شکل ۳).

شاخص پوشش گیاهی (NDVI): این شاخص یکی از عوامل مؤثر در جریان رواناب است و در پهنه‌بندی خطر سیل دارای اهمیت زیادی است. برای محاسبه شاخص NDVI طبق فرمول زیر از باند قرمز (RED) و مادون‌قرمز (NIR) تصاویر لندست ۹ و ۸ طی بازه ۵ ساله (۲۰۱۹-۲۰۲۳) استفاده شد (شکل ۴).

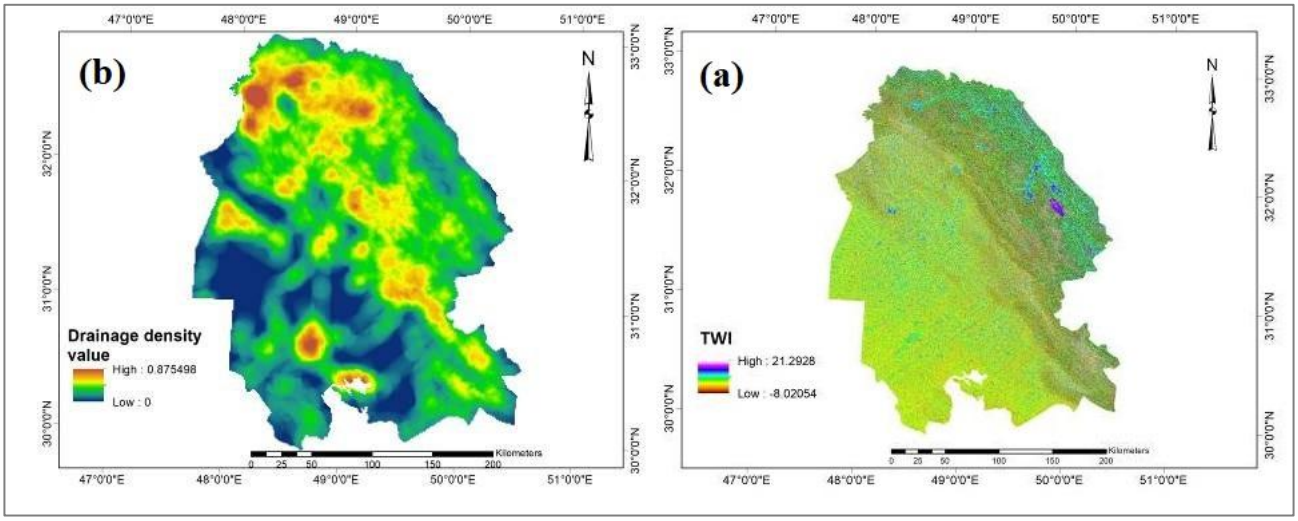
$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

شیب: شیب یکی از پارامترهای بسیار مهم در هیدرولوژی است که با مقدار نفوذپذیری، رطوبت خاک و جهت جریان رواناب رابطه مستقیم دارد و در جاری شدن سیلاب در حوزه نقش مؤثری دارد (Rostami et al., 2021). برای محاسبه این پارامتر از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با دقت ۳۰ متر استفاده شد (شکل ۴).

شاخص پوشش گیاهی (NDVI): این شاخص یکی از عوامل مؤثر در جریان رواناب است و در پهنه‌بندی خطر سیل دارای اهمیت زیادی است. برای محاسبه شاخص NDVI طبق فرمول زیر از باند قرمز (RED) و مادون‌قرمز (NIR) تصاویر لندست ۹ و ۸ طی بازه ۵ ساله (۲۰۱۹-۲۰۲۳) استفاده شد (شکل ۴).

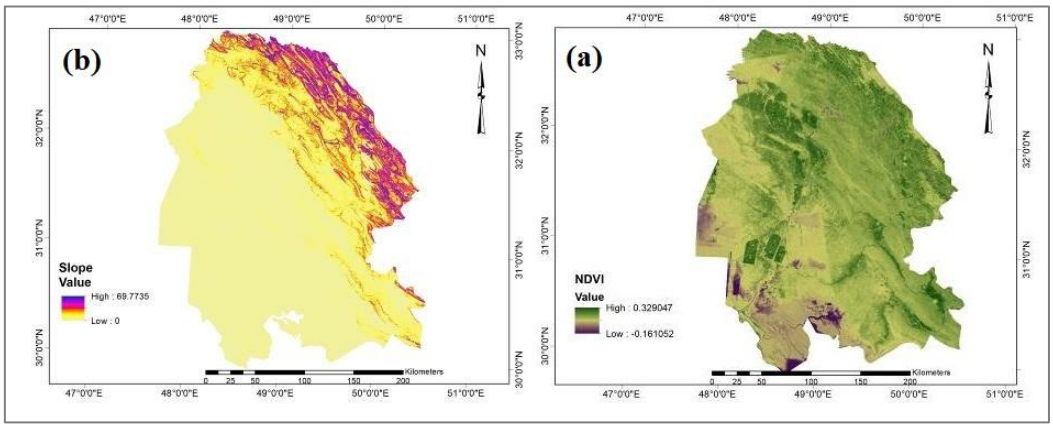
$$\mathbf{NDVI} = \frac{\mathbf{(NIR-RED)}}{\mathbf{(NIR+RED)}} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

شیب: شیب یکی از پارامترهای بسیار مهم در هیدرولوژی است که با مقدار نفوذپذیری، رطوبت خاک و جهت جریان رواناب رابطه مستقیم دارد و در جاری شدن سیلاب در حوزه نقش مؤثری دارد (Rostami et al., 2021). برای محاسبه این پارامتر از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با دقت ۳۰ متر استفاده شد (شکل ۴).



شکل ۳- (a) نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی، و (b) نقشه تراکم زهکشی.

Fig. 3. (a) Topographic moisture index map, and (b) drainage density map.



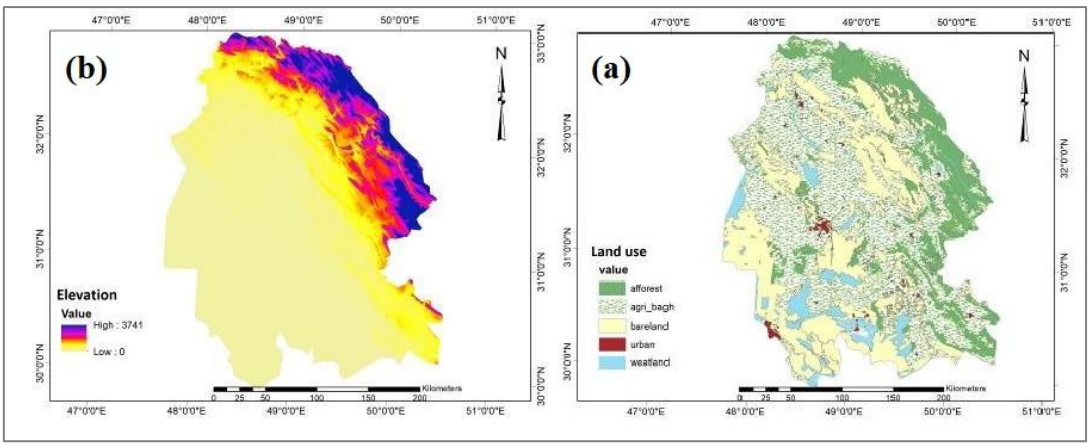
شکل ۴- (a) نقشه تراکم پوشش گیاهی، و (b) نقشه شیب منطقه مطالعاتی.
Fig. 4. (a) Vegetation density map, and (b) slope map of study area.

ارتفاع: ارتفاع از عوامل بسیار مهم در پدیده‌های هیدرولوژیکی است و تأثیر زیادی بر روی تغییرات دما و بارش دارد به طوری که نواحی غربی و جنوبی استان خوزستان که دارای ارتفاع کم و بارش‌های ناگهانی سیل زا هستند برای ما اهمیت بیشتری دارند (شکل ۵).

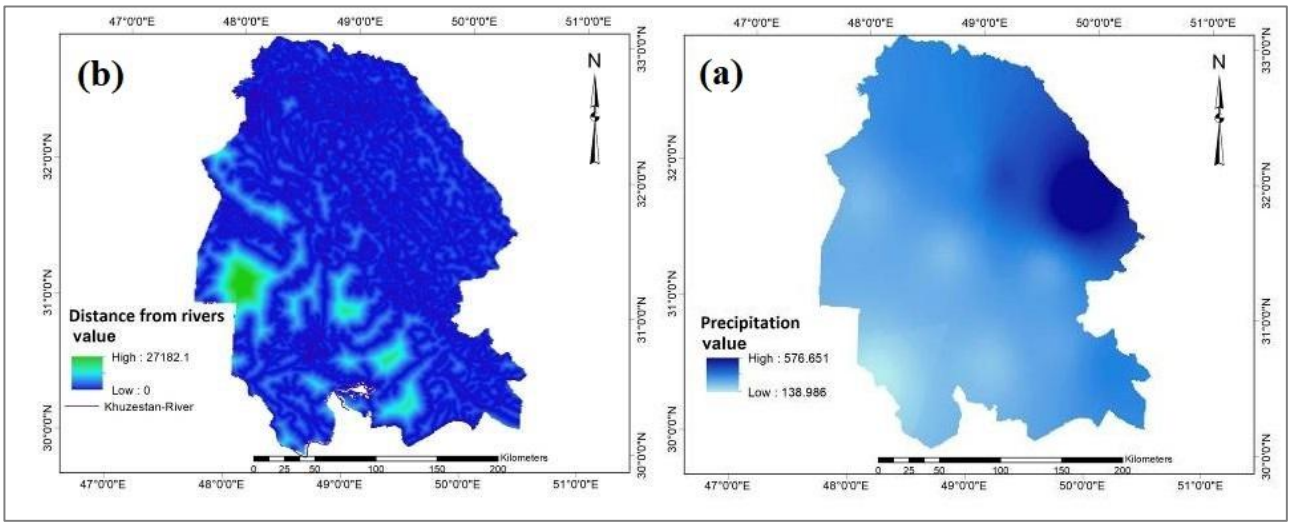
کاربری اراضی: یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در مخاطره سیلاب کاربری اراضی است که با توجه به تأثیر و اهمیت هرکدام از کاربری‌ها بر خطر سیلاب با دو روش AHP و FuzzyAHP طبق جداول ۵ و ۶ امتیازدهی شدند. به طوری که پوشش جنگلی دارای کمترین امتیاز و پهنه‌های آبی دارای بیشترین امتیاز هستند. برای بدست آوردن نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و ۸ در نرم‌افزار بارش: بارش یکی از عوامل تأثیرگذار در خطر سیل است. برای تهیه نقشه میانگین بارش منطقه از داده‌های ایستگاه‌های بارش استان خوزستان در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ استفاده شد به طوری که در این دوره زمانی بیشترین بارش مربوط به شهرستان ایذه با میانگین بارش ۵۹۰/۵۱ میلی‌متر و کمترین میانگین بارش مربوط به شهرستان آبادان با میانگین بارش ۱۳۸/۳۹ میلی‌متر است و برای بدست آوردن نقشه میانگین سالانه بارش استان از روش‌های درون‌یابی در محیط نرم‌افزار Arcmap 10.8 استفاده شد (شکل ۶).

فاصله از آبراهه: مؤثرترین عامل در رخداد سیل، طغیان رودخانه‌ها در اثر بارش است به عبارتی فاصله از رودخانه‌ها و آبراهه‌ها با رخداد سیل رابطه عکس دارد و هرچقدر فاصله از آبراهه‌ها و رودخانه‌ها کمتر باشد جریان سیلاب‌ها و خطر وقوع سیل افزایش می‌یابد (شکل ۶).

Envi 5.3 و نقشه خاک که از نقشه لیتولوژی منطقه استخراج شد (شکل ۵).



شکل ۵- (a) نقشه کاربری اراضی، و (b) نقشه ارتفاع منطقه مطالعاتی.
Fig. 5. (a) Land use map, and (b) elevation map of study area.

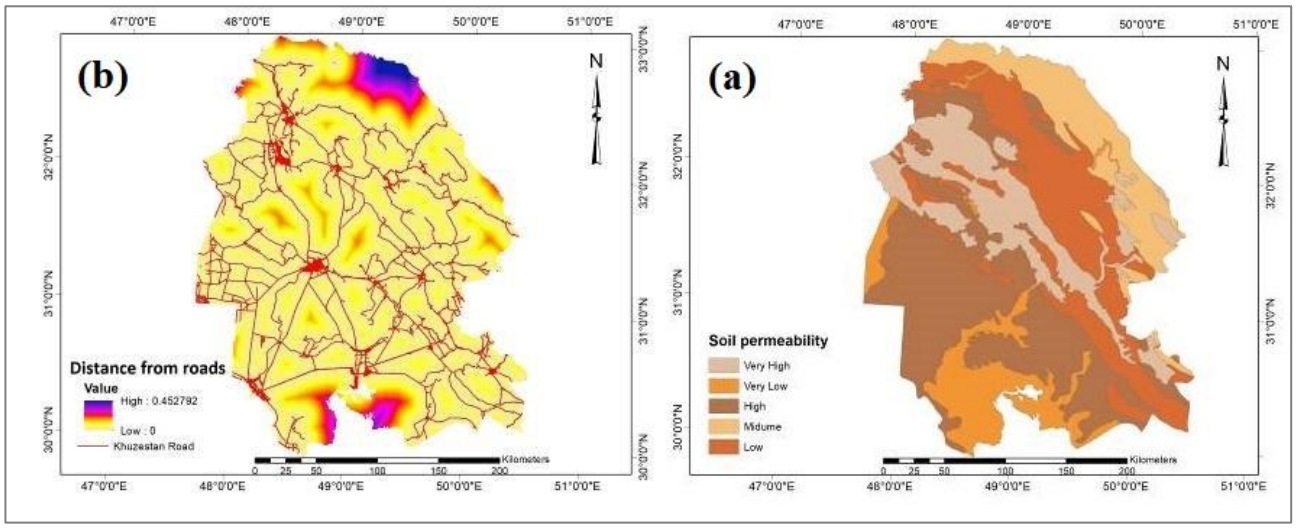


شکل ۶- (a) نقشه میانگین بارش، و (b) نقشه فاصله از آبراهه‌ها.

Fig. 6. (a) Average precipitation map, and (b) distance map from waterways.

فاصله از جاده: این فاکتور می‌تواند به عنوان عاملی مؤثر در جاری شدن رواناب و افزایش جریان سطحی در بارش‌های شدید در نظر گرفته شود. این افزایش جریان ممکن است ناشی از کاهش نفوذپذیری خاک در نواحی نزدیک به جاده باشد و یا به دلیل ایجاد سطوح نفوذ ناپذیر مانند اسفالت باشد (شکل ۷).

نفوذ پذیری خاک: نوع خاک و خصوصیات آن مانند میزان نفوذ پذیری از عوامل مؤثر در جریان رواناب بر رخداد سیل می‌باشد (Sharifi Pichoun and Parnoun, 2018). به طوری که خاک‌ها با نفوذ پذیری بالا توانایی جذب آب‌های سطحی را دارند و از جریان یافتن رواناب جلوگیری می‌کنند، اما خاک‌ها با نفوذ پذیری کم به دلیل توانایی بسیار کم در جذب و نفوذ آب به جریان رفتن رواناب در بارش‌های شدید به سوی رودخانه‌ها و سیلاب‌ها کمک می‌کند. در این تحقیق نوع خاک‌های استان خوزستان را بر اساس نفوذ پذیری به ۵ گروه تقسیم شدند و بر اساس میزان نفوذ پذیری، به آنها طبق روش AHP و FuzzyAHP وزن داده شد (شکل ۷).



شکل ۷- (a) نقشه نفوذپذیری خاک‌های منطقه، و (b) نقشه فاصله از راه‌ها.

Fig. 7. (a) Soil permeability map, and (b) distance map from roads.

۳-۲- روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (Analytical Hierarchy Process–AHP) که نخستین‌بار توسط توماس ساعتی معرفی شد، یکی از روش‌های رایج تصمیم‌گیری چندمعیاره است و بر پایه مقایسه‌های زوجی میان معیارها و گزینه‌ها عمل می‌کند. این روش با ساختاردهی سلسله‌مراتبی به مسئله، امکان تحلیل روابط میان هدف، معیارها و گزینه‌ها را فراهم می‌سازد و در نهایت با محاسبه وزن نسبی عناصر، اولویت‌بندی نهایی را ارائه می‌دهد.

این روش شامل سه فاز است که فاز اول ساختن سلسله‌مراتبی است. سلسله‌مراتبی نمایشی گرافیکی از مسائل پیچیده واقعی است که در رأس آن هدف کلی مسئله و در سطوح بعدی معیارها و گزینه‌ها قرار دارند. فاز دوم محاسبه وزن و ضرایب اهمیت از ماتریس‌های مقایسه زوجی است. برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی از جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱. شدت ارجحیت گزینه ها در روش AHP و FuzzyAHP.

Table 1. The preference intensity of alternatives in AHP and FuzzyAHP methods.

Linguistic scale for the importance	(AHP Value) Intensity of Importance	(Fuzzy AHP Value) Fuzzy scale
Same Preference of *A* Over B	1	(1,1,1)
Very Low Preference of *A* Over B	2	(1,2,3)
Low Preference of *A* Over B	3	(2,3,4)
Relatively Low Preference of *A* Over B	4	(3,4,5)
Medium Preference of *A* Over B	5	(4,5,6)
Relatively High Preference of *A* Over B	6	(5,6,7)
High Preference of *A* Over B	7	(6,7,8)
Very High Preference of *A* Over B	8	(7,8,9)
Unlimited Preference of *A* Over B	9	(9,9,9)

و فاز سوم محاسبه نرخ ناسازگاری و اصلاح ماتریس‌های ناسازگار می‌باشد که دارای سه‌گام است. گام اول، محاسبه بردار مجموع موزون یا WSV طبق رابطه ۴ است.

$$WSV = A \times (A_i)$$

دراین رابطه هریک از ماتریس‌های تصمیم (A) در بردار وزن آن ماتریس((W(Ai)) ضرب می‌شود (Sajadi et al., 2020). گام دوم، محاسبه بردار ناسازگاری یا ICV طبق رابطه زیر

$$ICV = WSV/(A_i \quad \text{(رابطه ۴)}$$

می‌باشد:

و گام سوم محاسبه میانگین درایه‌های بردار ناسازگاری (ICI) که این مقدار تقریبی از بزرگ‌ترین مقدار ویژه λ_{max} است. در این رابطه n برابر با تعداد شاخص‌ها است.

$$ICI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

و در نهایت نرخ ناسازگاری (ICR) از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$ICR = \frac{ICI}{RI} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

برای محاسبه وزن معیارها به روش AHP به دلیل حجم بالای محاسبات و افزایش دقت از نرم‌افزار EDRISI استفاده شد.

۳-۳- روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FuzzyAHP)

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی عبارت است از فازی‌سازی روش تحلیل سلسله‌مراتبی کلاسیک با استفاده از اعداد و محاسبات فازی، که یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین رویکردها است. این روش را مبتنی بر میانگین حسابی نظرات خبرگان و روش نرمال‌سازی ساعتی (ahp)، با استفاده از اعداد مثلثی فازی توسعه داد و برای تعریف اعداد فازی مثلثی از اعداد حقیقی (l,m,u) استفاده کرد.

برای محاسبه مقادیر نرمال هریک از سطرهای ماتریس، مقایسه زوجی ماتریس (S_i) طبق رابطه ۷ محاسبه شد.

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \times \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در رابطه فوق M اعداد فازی داخل ماتریس مقایسه‌های زوجی است. در این رابطه هنگام محاسبه ماتریسS هریک از

اجزاء اعداد فازی بطور نظیر به نظیر جمع می‌شوند و در معکوس فازی مجموع کل ضرب می‌شوند.

برای تعیین شدت برتری پارامترها از نظر درجه بزرگی با یکدیگر طبق رابطه ۸ مقایسه می‌شوند (Razmi et al., 2017).

(رابطه۸)

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & \text{اگر } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{اگر } m_2 \leq m_1 \\ \dfrac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

دراین‌رابطه M_1 و M_2 دو عدد فازی مثلثی هستند.

$$M_2 = (l_2, m_2, u_2)\,, M_1 = (l_1, m_1, u_1)$$

در نهایت برای محاسبه وزن نسبی، وزن‌های اولیه که طبق رابطه ۸ به دست آمدند بر مجموعه‌شان تقسیم شدند و برای بدست آوردن وزن نهایی، وزن هر شاخص در وزن‌های بدست آمده از ماتریس مقایسات گزینه‌ها ضرب شد.

برای این تحقیق، جهت انجام مقایسات زوجی و تعیین وزن معیارها، از نظرات بیست کارشناس خبره استفاده شد. انتخاب خبرگان به‌صورت هدفمند (Purposeful sampling) و بر اساس تخصص و تجربه مرتبط انجام گرفت. ترکیب خبرگان شامل اعضای هیئت‌علمی و دانشجویان دکتری دارای تخصص در حوزه‌های مهندسی آب، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و زمین‌شناسی بود. این افراد به دلیل آشنایی عمیق با فرآیندهای حوضه آبریز، رفتار سیلاب، تحلیل مکانی و مخاطرات طبیعی، برای ارزیابی و وزن‌دهی معیارهای مورد استفاده در مدل مناسب تشخیص داده شدند. همچنین به دلیل تفاوت نظرات در پرسشنامه‌ها برای بدست آوردن ارزش نهایی هر معیار، میانگین حسابی کل نظرات برای هر معیار محاسبه و ماتریس همبستگی برای هر دو روش به دست آمد و در نهایت بر این اساس وزن‌دهی به دو روش انجام شد و سپس نرخ ناسازگاری معیارها (نرخ ناسازگاری باید کمتر از ۰/۱ باشد)، در هر دو روش محاسبه شد.

۳-۴- فیوزن AHP و FuzzyAHP

فرایند فیوزن داده‌ها شامل جمع‌آوری، پردازش و ترکیب داده‌ها از منابع مختلف به منظور ایجاد یک مجموعه داده منسجم و دقیق به صورت کاملاً سازگار است (Khaleghi et al., 2009). این کار باعث حذف نقاط ضعف روش‌های منفرد و حفظ نقاط قوت آن‌ها در خروجی ادغام شده می‌شود (Salehiyan Ghamsari et al., 2019). در این پژوهش، از روش تلفیق مبتنی بر سطح تصمیم برای تلفیق نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب تولیدشده با روش‌های AHP و FuzzyAHP استفاده شد مراحل استفاده از این روش به شرح زیر است:

استخراج ویژگی‌ها:

ابتدا برای هر نقشه خطر سیلاب (AHP وFuzzy AHP) تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) اعمال شد تا ویژگی‌های غالب و نقاط قوت هر روش استخراج شوند.

به این صورت که اگر X_i نماینده نقشه خطر سیلاب تولیدشده توسط روش i باشد، ICA آن را به صورت زیر تجزیه می‌کند:

$$X_i = A_i S_i \qquad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن S_i مولفه‌های مستقل و A_i ماتریس ترکیب‌کننده هستند.

طبقه‌بندی مجدد:

پس از استخراج ویژگی‌ها با ICA، گام بعدی طبقه‌بندی مجدد این ویژگی‌هاست تا هر پیکسل نقشه خطر سیلاب به یک کلاس مشخص (مثلاً پرخطر یا کم‌خطر) اختصاص یابد. برای این کار ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شد. تابع تصمیم SVM برای یک بردار ورودی x به صورت زیر عمل می‌کند:

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{j=1}^{N} \alpha_i y_i K\left(x_j, x\right) + b\right) \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

که در این رابطه α_i وزن هر نمونه آموزش، y_i کلاس نمونه، K تابع هسته‌ای (Kernel) که مشخص می‌کند فاصله یا شباهت بین نمونه آموزش x_j و داده جدید x چقدر است و b به عنوان خط تصمیم عمل می‌کند و مطابق تابع sing بین ۱- و ۱ است.

فیوژن سطح سطح تصمیم با انتگرال فازی (Fuzzy Integral):

برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد ادغام داده‌ها از انتگرال فازی با عملگر OR فازی استفاده شد. برای مجموعه‌ای از مقادیر تصمیم که توسط هر روش تولید شده، خروجی نهایی D به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \max(d_1, d_2, ..., d_n) \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

این روش مقدار با اعتماد بالاتر هر روش را به عنوان خروجی نهایی انتخاب می‌کند و نقاط قوت هر روش را در هر پیکسل حفظ می‌کند (Nekouei et al., 2019).

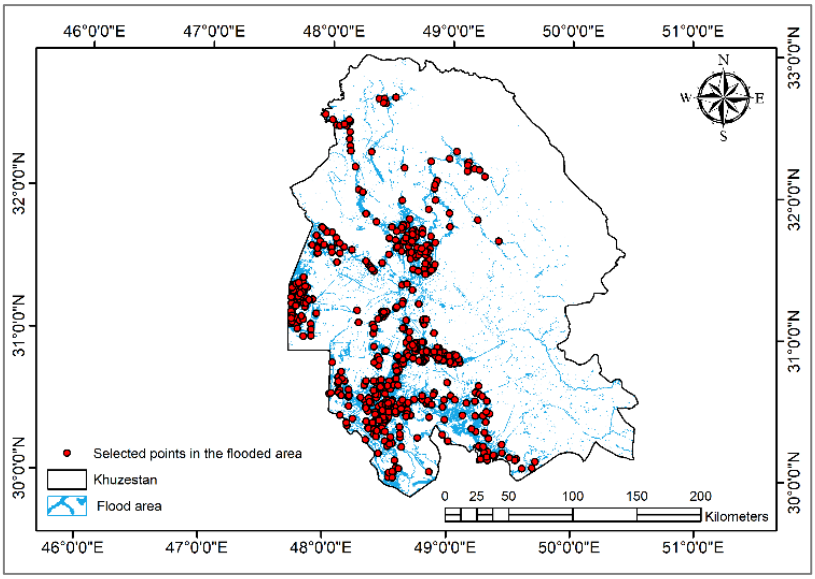
۳-۵- صحت سنجی

جهت صحت سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از هر سه روش پیشنهادی در این تحقیق، نقشه سیل سال ۱۳۹۹-۱۳۹۸ استان خوزستان بکار گرفته شد. برای بدست آوردن نقشه سیل از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ (در تاریخ ۲۰۱۹/۰۴/۰۸) معادل اواخر اسفند سال ۱۳۹۸ و فروردین سال ۱۳۹۹ و تصاویر ماهواره‌ای در سال ۲۰۲۳ برای نشان دادن تغییرات آبی استفاده شد. همچنین برای بدست آوردن مساحت سیل و استخراج محدوده‌ای که در آن سیل اتفاق افتاده از شاخص MNDWI طبق رابطه زیر در محیط نرم‌افزار Envi 5.3 استفاده شد.

شاخص MNDWI: از ترکیب باندهای سبز (Green) و مادون قرمز میانی (Mir) بدست می‌آید. در این شاخص به راحتی می‌توان نویزهای ایجاد شده توسط پوشش گیاهی را حذف کرد، همچنین در این شاخص مقادیر مثبت، حجم آب و مقادیر منفی، نویزها را منعکس می‌کند (Razmi et al., 2017).

$$\mathrm{MNDWI} = \frac{(\mathrm{Green} - \mathrm{Mir})}{(\mathrm{Green} + \mathrm{Mir})} \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

شیوه کار به این صورت است که در محدوده سیل زده ۵۰۰ نقطه به صورت رندوم انتخاب شدند (شکل ۸). سپس کلاس هرکدام از نقاط طبق نقشه‌های پهنه‌بندی مشخص شد.



شکل ۸- محدوده سیل زده و ۵۰۰ نقطه انتخابی برای صحت سنجی نتایج.

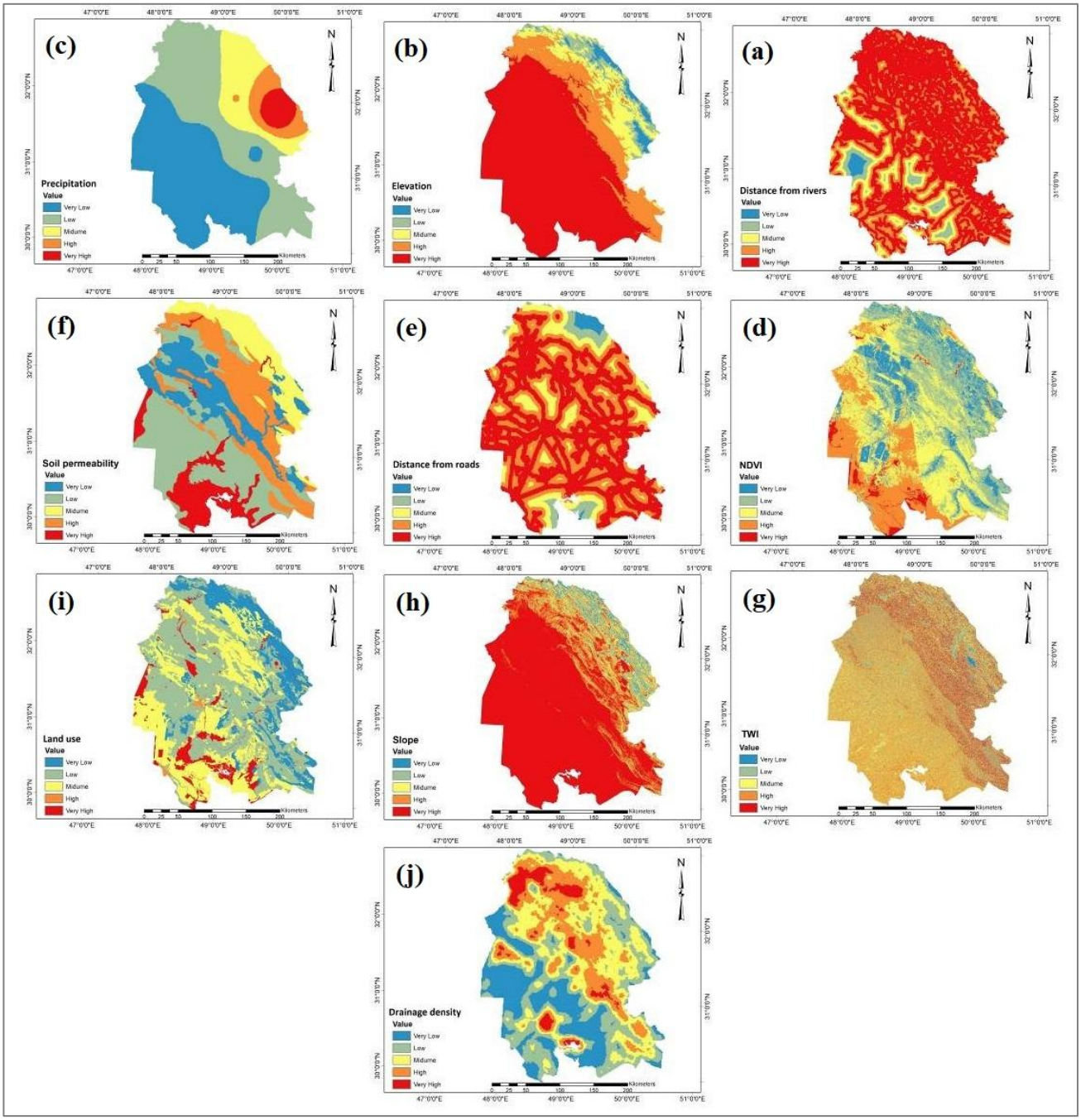
Fig. 8. Flooded area and 500 selected points for results verification.

۴-نتایج

استاندارد سازی معیارها لازمه اختصاص وزن به معیارها در هر دو روش هست به طوری که در روش AHP، استاندارد سازی با کلاس بندی لایه ها به ۵ کلاس (اهمیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) انجام شد. کلاس با اهمیت زیاد به ارتفاعات کم و مناطق پست که نواحی غربی و جنوبی استان خوزستان را شامل می شود، شیب های کم و مناطق با میانگین بارش زیاد شامل نواحی شمالی و شمال شرقی استان خوزستان، شاخص توپوگرافی کم، کاربری آبی، شاخص پوشش گیاهی کم، کمترین فاصله از رودخانه و کمترین فاصله از جاده، تراکم زهکشی بالا و خاک با نفوذ پذیری بسیار کم اختصاص داده شد (شکل ۹). همچنین برای وزن دهی به روش AHP طبق جدول ۲ از ابزار weighted overlay در نرم افزار Arcmap 10.8 استفاده شد.

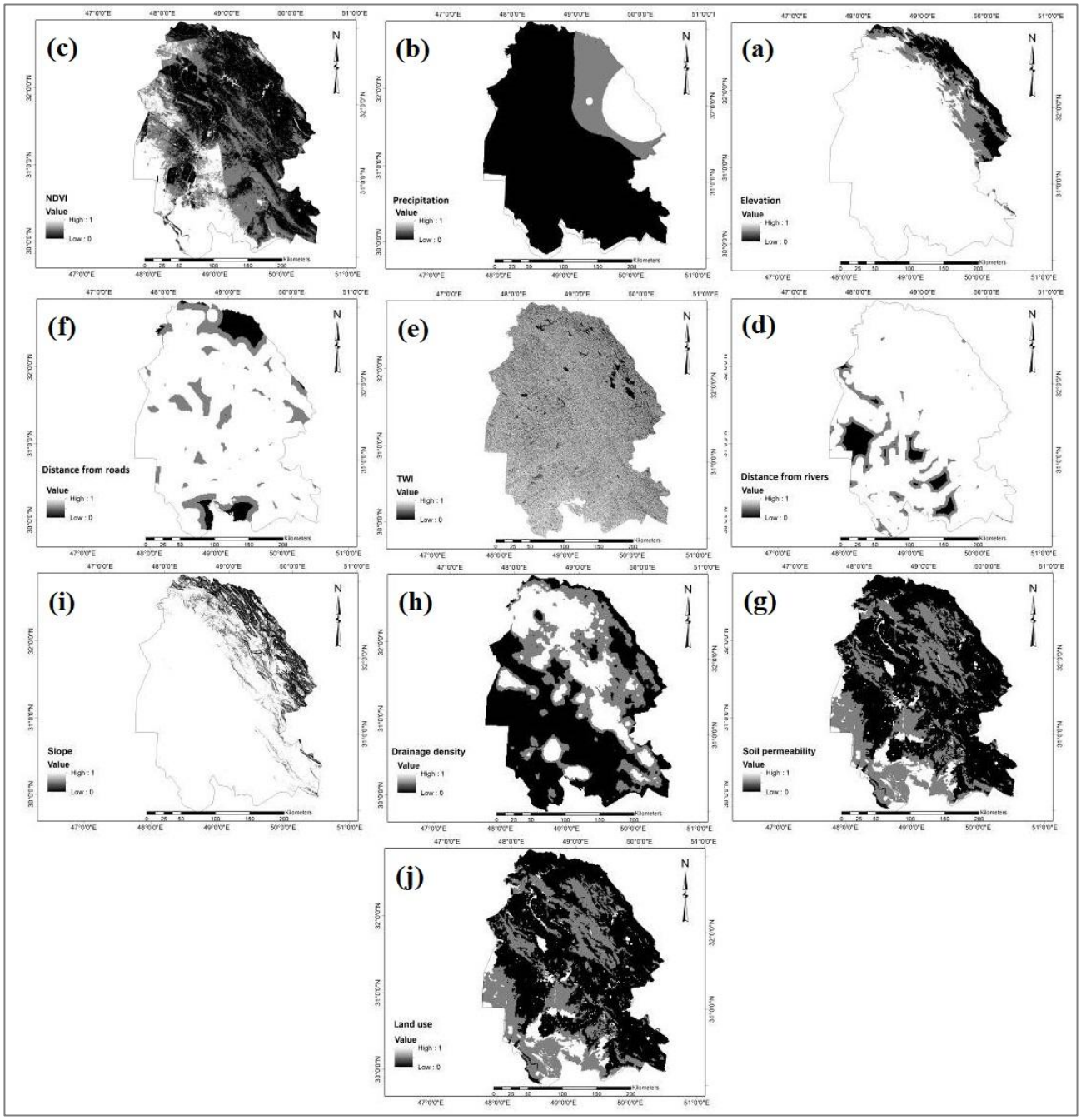
جهت استانداردسازی لایه‌ها با روش FuzzyAHP از تابع خطی liner استفاده شد. طبق این تابع ارزش مقادیر اندازه گیری شده برای هر معیار در بازه صفر و یک قرار گرفت (شکل ۱۰). تابع با عضویت برابر ۱ نشان دهنده عضویت کامل در

مجموعه یا به عبارتی دیگر در رخداد سیل دارای اهمیت بیشتری است و مقدار صفر نشان دهنده عضویت نداشتن در مجموعه است (Ziyari et al, 2021). و در نهایت هر لایه در وزن فازی خود طبق جدول ۲ ضرب شد. برای بدست آوردن نقشه پهنه‌بندی نهایی تابع sum از سری توابع fuzzy overlay استفاده شد. این تابع نسبت به توابع دیگر fuzzy overlay نتیجه بهتری با توجه به نقشه سیل سال ۹۸-۹۹ استان خوزستان ارائه داد.



شکل ۹- استانداردسازی معیارها برای روش تحلیل AHP. (a) فاصله از رودخانه‌ها، (b) ارتفاع، (c) بارش، (d) NDVI، (e) فاصله از جاده‌ها، (f) نفوذپذیری خاک، (g) TWI، (h) شیب، (i) کاربری اراضی، و (j) تراکم زهکشی.

Fig. 10. Standardization of criteria for AHP analysis method. (a) distance from rivers, (b) elevation, (c) precipitation, (d) NDVI, (e) distance from roads, (f) soil permeability, (g) TWI, (h) slope, (i) land use, and (j) drainage density.



شکل ۱۰- استانداردسازی معیارها برای روش تحلیل FuzzyAHP. (a) ارتفاع، (b) بارش، (c) NDVI، (d) فاصله از رودخانه‌ها، (e) TWI، (f) فاصله از جاده‌ها، (g) نفوذپذیری خاک، (h) تراکم زهکشی، (i) شیب، و (j) کاربری اراضی.

Fig. 10. Standardization of criteria for FuzzyAHP analysis method. (a) elevation, (b) precipitation, (c) NDVI, (d) distance from rivers, (e) TWI, (f) distance from roads, (g) soil permeability, (h) drainage density, (i) slope, and (j) land use.

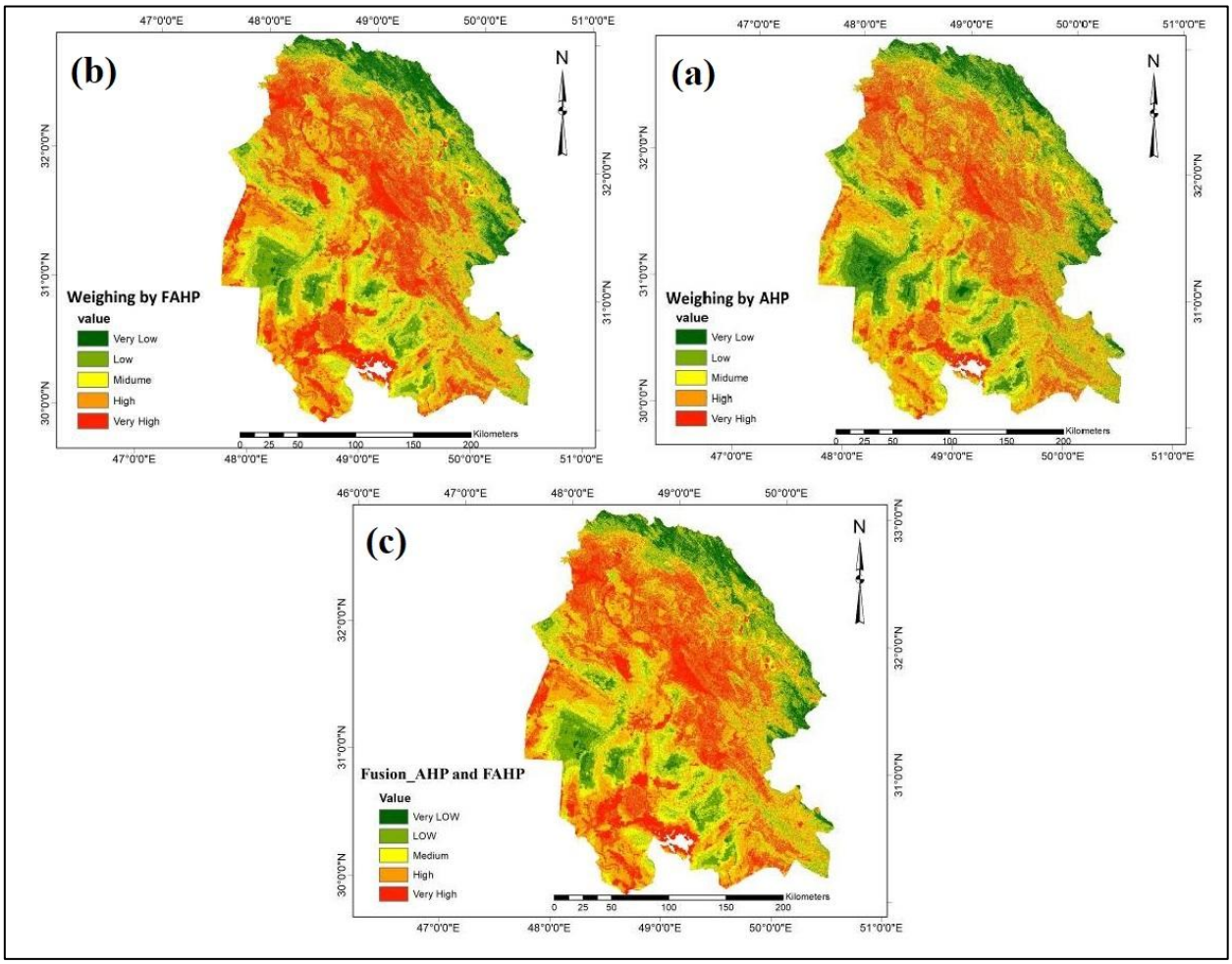
جدول ۲. وزن‌دهی به دو روش AHP و FuzzyAHP.

Table 2. Weighting using two methods of AHP and FuzzyAHP.

Factors	Weights by AHP	Weights by Fuzzy AHP	Inconsistency Ratio (AHP)	Inconsistency Ratio (Fuzzy AHP)
Slope	0.0954	0.097890006	0.028<0.1	0.043<0.1
Elevation	0.1193	0.122959405		
Distance from Roads	0.0638	0.057677735		
Distance from Rivers	0.1308	0.139385877		
TWI	0.1581	0.13808586		
Drainage density	0.0899	0.093293896		
Precipitation	0.1212	0.126577148		
NDVI	0.0679	0.065928974		
Soil permeability	0.0899	0.093293896		
<Value>	-	-		
Very Low	0.6113	0.053398413		
Low	0.1926	0.086529702		
Medium	0.0854	0.154643388		
High	0.0633	0.169992737		
Very High	0.0474	0.53543576		
Land use	0.0638	0.064907202		
<Value>	-	-		
afforest	0.0589	0.03712392		
Agri	0.0766	0.051447816		
Breland	0.1822	0.102824339		
urban	0.1857	0.111854088		
Wetland	0.4966	0.696749838		
SUM	1	1		

در روشAHP ، بیشترین وزن به ترتیب به شاخص‌های رطوبت توپوگرافی، فاصله از رودخانه و میانگین بارش اختصاص یافت و در روش FuzzyAHP نیز همین سه شاخص بیشترین اهمیت را داشتند. علت تعلق بالاترین وزن به این شاخص‌ها، نقش مستقیم و مؤثر آن‌ها در وقوع سیل است. شاخص رطوبت توپوگرافی میزان آب موجود در خاک و ظرفیت نفوذ آن را نشان می‌دهد. خاک‌های با رطوبت بالا سریع‌تر اشباع شده و احتمال جاری شدن سیل در این مناطق افزایش می‌یابد. شاخص فاصله از رودخانه نیز اهمیت بالایی دارد، زیرا هرچه فاصله از رودخانه کمتر باشد، احتمال وقوع سیل ناشی از سرریز رودخانه بیشتر است. علاوه بر این، میانگین بارش به طور مستقیم بر شدت و احتمال وقوع سیل تأثیرگذار است.

در مقابل، شاخص فاصله از جاده کمترین وزن را دارد، زیرا نقش مستقیمی در وقوع سیل ندارد و بیشتر بر دسترسی و مدیریت حوادث مرتبط با سیل تأثیرگذار است. این نتایج نشان می‌دهد که وزن‌دهی حاصل از هر دو روش، به خوبی با فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با سیل همخوانی دارد و بیانگر اهمیت شاخص‌های کلیدی در تعیین مناطق پرخطر سیل است. وزن‌های حاصل از هر دو روش وزن‌دهی برای معیارها نزدیک به هم هستند، اما چون FuzzyAHP روشی مبتنی بر عدم قطعیت است و دامنه‌ای از مقادیر را برای بیان عدم قطعیت تصمیم گیرندگان در نظر می‌گیرد نسبت به روش AHP که مبتنی بر مقایسه دودویی معیارهاست دقیق‌تر است (Nasrin Nejad et al., 2014). در پژوهش حاضر برای مقایسه این دو روش، وزن‌دهی به دو صورت انجام شد و نقشه پهنه‌بندی بر اساس دو روش حاصل شد. سپس برای بدست آوردن نتایج بهتر و همچنین استفاده از نقاط قوت هر کدام از روش‌های AHP و FuzzyAHP روشی مبتنی بر فیوژن نتایج دو روش اتخاذ شد و نقشه‌های پهنه‌بندی به سه روش بدست آمد (شکل ۱۱).



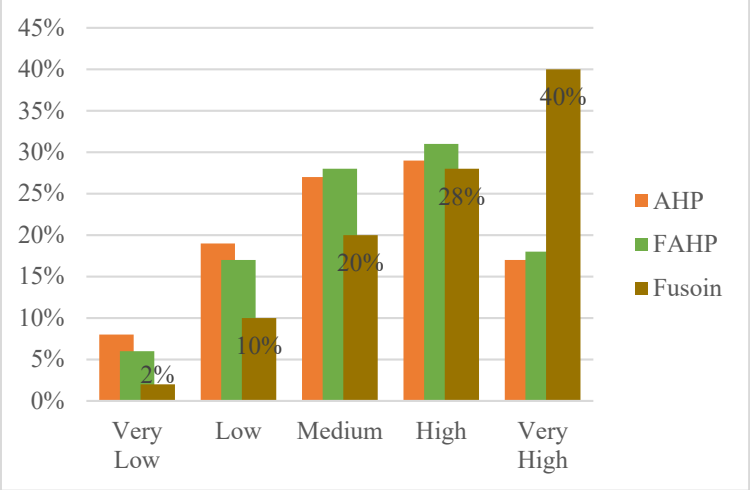
شکل ۱۱- پهنه‌بندی خطر سیل (a) با AHP، (b) با FuzzyAHP، و (c) با روشی مبتنی فیوژن دو روش AHP و FuzzyAHP.

Fig. 11. Flood risk zoning (a) using AHP, (b) using FuzzyAHP, and (c) using a fusion-based method of two AHP and FuzzyAHP methods.

جدول ۳. محاسبه درصد و مساحت کلاس‌های هر دو نقشه پهنه‌بندی.

Table 3. Calculate the percentage and area of the classes of both zoning maps.

	AHP		Fuzzy AHP		Fusoin	
Classes	Percent	Area	Percent	Area	Percent	Area
Very Low	8%	5062.787	6%	3971.413	2%	2799.04
Low	19%	11545.37	17%	10416.74	10%	23822.99
Medium	27%	16376.65	28%	16997.13	20%	46234.89
High	29%	17669.39	31%	18893.98	28%	63721.91
Very High	17%	10692.47	18%	11067.4	40%	91166.55



شکل ۱۲- نمودار درصد کلاس‌ها.
Fig. 14. Classes percentage chart.

۵-بحث

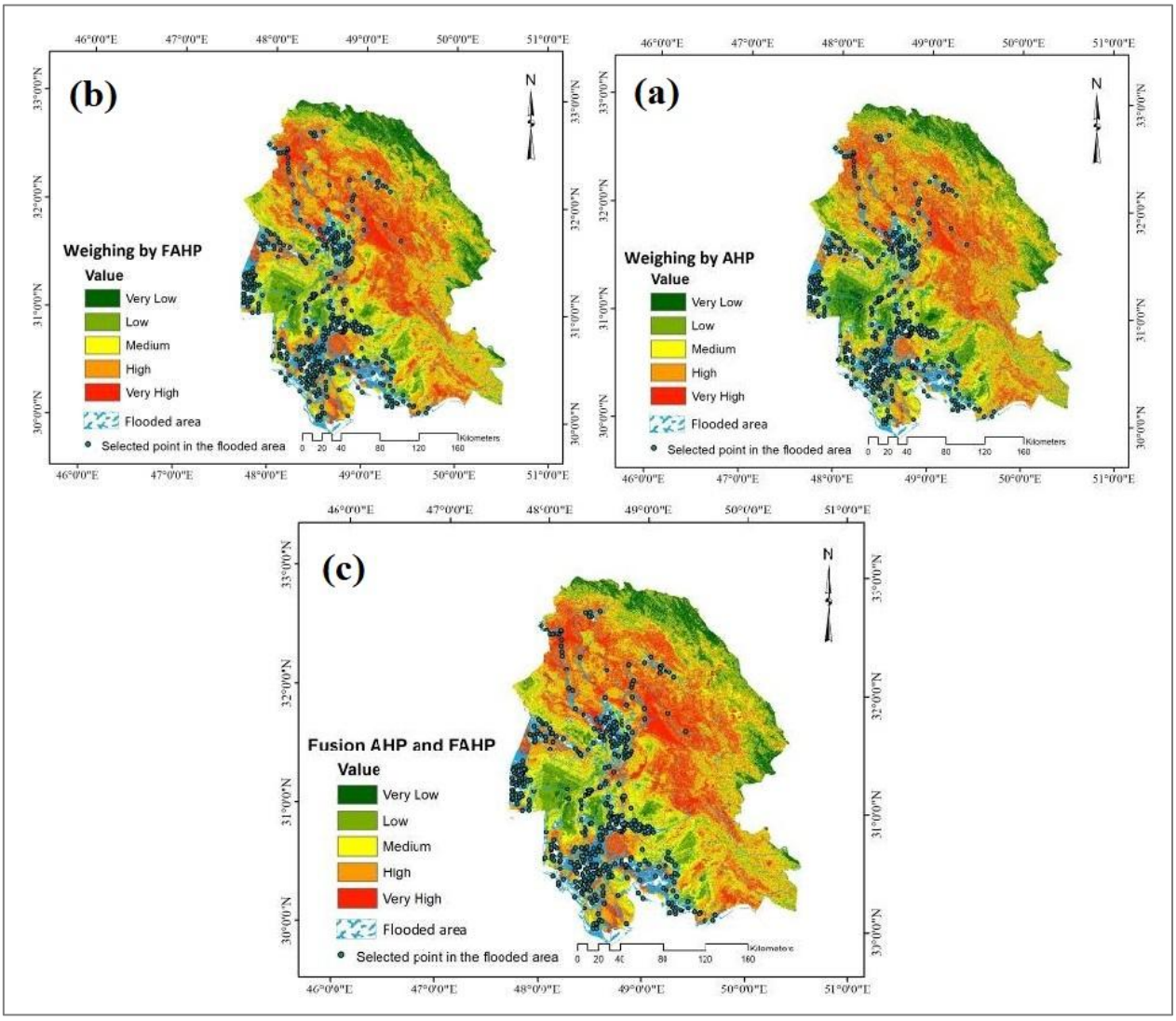
نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب استان خوزستان، با استفاده از مدل AHP (شکل۱۱)، تمرکز بالای خطر را در دشت‌های کم‌ارتفاع مرکزی و جنوبی استان نشان می‌دهد. نواحی با رنگ‌های نارنجی (High) و قرمز (Very High) به عنوان نقاط بحرانی شناسایی شده‌اند. انسجام این نقاط پرخطر ناشی از هم‌زمانی چندین عامل مؤثر است که در مدل AHP وزن بالایی دریافت کرده‌اند. این مناطق عمدتاً دارای شیب کم و ارتفاع پایین هستند که مانع تخلیه سریع آب و موجب تجمع رواناب و طغیان رودخانه‌ها می‌شوند. همچنین، مقادیر بالای شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI) نشان‌دهنده پتانسیل بالای اشباع خاک است. فاصله کم از رودخانه‌های اصلی مانند کارون، کرخه و دز و نفوذپذیری پایین خاک (به ویژه خاک‌های رسی و ریزدانه) موجب می‌شود بخش عمده بارش به رواناب تبدیل شود. ترکیب این عوامل باعث تمرکز بالای مناطق پرخطر در نقشه و شناسایی آن‌ها به عنوان کانون‌های اصلی سیلاب در استان شده است.

نقشه پهنه‌بندی با روش FAHP (فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی) نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱)، با این تفاوت که استفاده از منطق فازی، عدم قطعیت داده‌ها و قضاوت‌ها را بهتر لحاظ کرده و مناطق پرخطر را به شکلی پیوسته‌تر و با دقت بیشتر طبقه‌بندی کرده است. تمرکز نقاط پرخطر نشان‌دهنده ارتباط مستقیم سیلاب با نزدیکی به آبراهه‌های اصلی و نفوذپذیری پایین خاک است. مناطق ایمن همچنان به ارتفاعات شمالی محدود شده‌اند که شیب زیاد مانع تجمع سیلاب می‌شود.

نقشه تلفیقی (Fusion) حاصل از ترکیب نتایج AHP و FAHP، قوی‌ترین و متمرکزترین سطح خطر را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). این مدل با افزایش مساحت کلاس‌های پرخطر، حدود ٪۴۰ از مساحت استان را در طبقات Very High و High قرار داده است (در مقایسه با ٪۱۷ و ٪۱۸ مدل‌های منفرد). تمرکز خطر در دشت‌های مرکزی و جنوبی، اطراف آبراهه‌ها و نواحی با شیب کم و نفوذپذیری پایین است، در حالی که مناطق ایمن در شمال و شمال شرق محدود و پراکنده‌اند (جدول۳).

همچنین مقایسه مساحت و درصد هر کلاس نشان می‌دهد بیشترین درصد مساحت در هر دو روش AHP و FAHP مربوط به کلاس پرخطر است (٪۲۹ در AHP و ٪۳۱ در FAHP) و کمترین درصد مربوط به کلاس بی‌خطر (٪۸ در AHP و ٪۶ در FAHP) است. نقشه تلفیقی با افزایش مساحت کلاس‌های بسیار پرخطر و کاهش مساحت کلاس‌های کم‌خطر و بی‌خطر، تمرکز بالاتری در مناطق حساس ایجاد کرده و اهمیت بیشتری برای مدیریت خطر سیلاب دارد.

برای صحت سنجی، نقاط انتخاب شده در محدوده سیل زده با هرکدام از نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل مقایسه شد تا کلاس مربوط به نقاط تعیین شود (جدول ۴ و شکل ۱۴). بر این اساس تعیین شد که کدام یک از روش‌های پیشنهادی و نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از آن روش توانسته است پهنه‌بندی خطر سیل را بهتر به نمایش بگذارد.



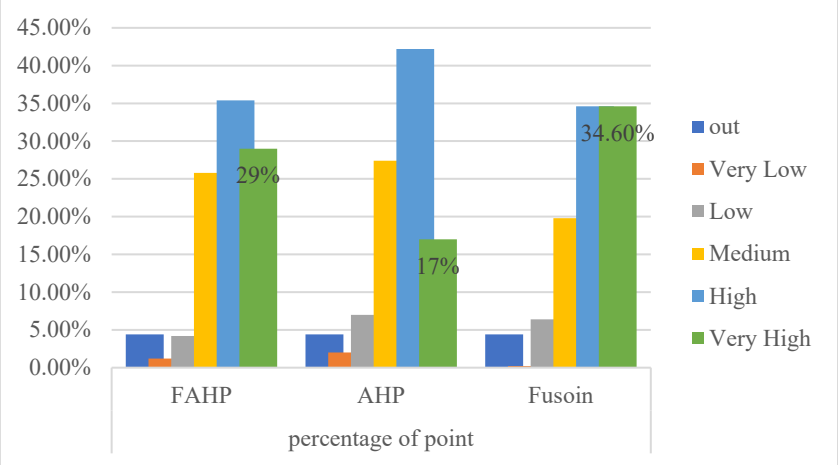
شکل ۱۳- محدوده سیل زده و نقاط انتخابی در محدوده سیل زده در هر سه نقشه پهنه‌بندی خطر سیل. (a) پهنه بندی با روش AHP، (b) پهنه‌بندی با روش FAHP، و (c) پهنه‌بندی با روشی مبتنی بر فیوژن AHP and FAHP.

Fig. 15. Flooded area and selected points within the flooded area in all three flood risk zoning maps. (a) zoning with AHP method, (b) zoning with FAHP method, and (c) zoning with fusion of AHP and FAHP.

جدول ۴. درصد و تعداد نقاط در نقشه‌های پهنه‌بندی بدست آمده.

Table 4. Percentage and number of points in the obtained zoning maps.

	number of Point			percentage of Point		
Classes	Fuzzy AHP	AHP	Fusoin	Fuzzy AHP	AHP	Fusoin
out	22	22	22	4.40%	4.40%	4.40%
Very Low	6	10	1	1.20%	2%	0.20%
Low	21	35	32	4.20%	7%	6.40%
Medium	129	137	99	25.80%	27.40%	19.80%
High	177	211	173	35.40%	42.20%	34.60%
Very High	145	85	173	29%	17%	34.60%



شکل ۱۴- درصد نقاط سیل زده در نقشه‌های پهنه‌بندی بدست آمده.

Fig. 16. Percentage of flooded points in the obtained zoning maps.

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مبتنی بر درصد نقاط سیل‌زده در محدوده وقوع سیلاب سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۸ نشان می‌دهد که روش FuzzyAHP در مقایسه با AHP عملکرد دقیق‌تری در شناسایی نواحی با خطر بالا و بسیار بالا داشته است. در مدل AHP حدود ۵۹/۲۰ درصد (۲۹۶ نقطه) از نقاط سیلابی در کلاس‌های خطر بالا (۴۲/۲۰٪) و بسیار بالا (۱۷٪) قرار گرفته‌اند. در حالی که در مدل FuzzyAHP این مقدار به ۶۴/۴۰ درصد (۳۲۲ نقطه) افزایش یافته است (خطر بالا: ۳۵٪/۴۰، خطر بسیار بالا: ۲۹٪). این برتری۵/۲ واحد درصدی نشان‌دهنده توانایی FuzzyAHP در لحاظ کردن عدم‌قطعیت‌های ذاتی معیارهای تصمیم‌گیری و در نتیجه تفکیک دقیق‌تر مناطق آسیب‌پذیر است.

همچنین، در کلاس خطر متوسط، توزیع نقاط در دو روش تفاوت محسوسی ندارد (AHP: ۲۷/۴۰ ٪ ، FuzzyAHP: ۲۵/۸۰ ٪) علاوه بر این، درصد بسیار اندک نقاط واقع در کلاس‌های کم‌خطر (Very Low و Low) برای هر دو مدل (AHP: ۹ درصد، FuzzyAHP: ۵/۴ درصد) تأیید می‌کند که هیچ‌یک از روش‌ها مناطق سیل‌خورده را به‌طور نادرست در پهنه‌های ایمن طبقه‌بندی نکرده‌اند.

برجسته‌ترین یافته این پژوهش به روش تلفیق (Fusion) مربوط است. روشی که با تلفیق خروجی‌های دو مدل AHP و FuzzyAHP، دقیق‌ترین الگوی پهنه‌بندی خطر را ارائه کرده است. در این روش، سهم نقاط واقع در کلاس‌های خطر بالا و بسیار بالا به ۷۰/۶ درصد (۳۴۶ نقطه) رسیده است (خطر بالا: ۳۴٪/۶، خطر بسیار بالا: ۳۶٪) که بالاترین مقدار در میان هر سه روش محسوب می‌شود و بیانگر هم‌افزایی مؤثر حاصل از ترکیب مدل‌ها است. این بهبود با کاهش محسوس سهم نقاط در کلاس خطر متوسط (۱۹/۸۰٪) نسبت به AHP (۲۷٪/۴۰) و FuzzyAHP (۲۵/۸۰٪) نیز پشتیبانی می‌شود. موضوعی که نشان می‌دهد مدل تلفیقی، عدم‌قطعیت را تا حد قابل توجهی کاهش داده و قدرت تفکیک‌پذیری بیشتری در مرزبندی کلاس‌های خطر فراهم کرده است. در مجموع، اگرچه FuzzyAHP به‌تنهایی عملکردی بهتر از AHP دارد، اما مدل تلفیقی دقیق‌ترین و کارآمدترین چارچوب برای صحت‌سنجی و نمایش الگوی واقعی خطر در این پژوهش محسوب می‌شود.

۶-نتیجه‌گیری

سیل یکی از پدیده‌های طبیعی مخرب است که امروزه با بهره‌گیری از علم سنجش از دور و GIS امکان پهنه‌بندی خطر، پیش‌بینی نواحی مستعد سیلاب و برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات آن فراهم شده است. در این پژوهش، ده شاخص طبیعی مؤثر در وقوع سیل انتخاب و وزن‌دهی آن‌ها با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP و FuzzyAHP انجام شد و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل برای استان خوزستان تهیه گردید. افزون بر این، یک رویکرد نوین مبتنی بر تلفیق در سطح تصمیم بکار گرفته شد تا با ادغام نتایج دو مدل و بهره‌گیری از نقاط قوت هر یک، دقت نهایی نقشه‌های خطر افزایش یابد. نتایج نشان داد که در نقشه‌های حاصل از دو روش AHP و FuzzyAHP، بیشترین مساحت مربوط به کلاس

پرخطر است (به‌ترتیب ۲۹ درصد و ۳۱ درصد). در حالی که در نقشه تلفیقی، بیشترین مساحت به کلاس بسیار پرخطر اختصاص یافت (۴۰ درصد) که نشان‌دهنده‌ی توان روش فیوزن در برجسته‌سازی کانون‌های اصلی سیلاب است. مقایسه‌ی نتایج صحت‌سنجی نیز بیانگر آن است که در روش AHP حدود ۵۹ درصد از نقاط سیل‌خورده واقعی در کلاس‌های پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفتند. این مقدار در روش FuzzyAHP به ۶۵ درصد افزایش یافت. با این حال، روش فیوزن عملکرد بهتری از خود نشان داد و توانست ۷۰ درصد از نقاط سیل‌خورده را به‌درستی در طبقات پرخطر و بسیار پرخطر قرار دهد. این امر نشان‌دهنده‌ی بهبود ۱۱ درصدی نسبت به AHP و بهبود ۵ درصدی نسبت به FuzzyAHP است. تحلیل وزن شاخص‌ها نیز نشان داد که بارش، فاصله از آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بیشترین اهمیت را در تعیین خطر سیل دارند. نواحی شمال‌شرقی استان با وجود بارش نسبتاً زیاد، به دلیل ارتفاعات و شیب بالا و فصلی بودن آبراهه‌ها در کلاس کم‌خطر قرار گرفتند. در حالی که مناطق مرکزی، شمال‌غربی و جنوب استان با وجود میانگین بارش کمتر، به سبب وقوع بارش‌های ناگهانی، وجود رودخانه‌های دائمی، شیب کم و نفوذپذیری پایین خاک، در کلاس‌های پرخطر و بسیار پرخطر قرار گرفتند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش تلفیق می‌تواند دقت پهنه‌بندی خطر سیل را نسبت به روش‌های پایه به‌طور معناداری افزایش دهد و ابزار قابل اعتمادتری برای مدیریت بحران، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، تعیین اولویت اقدامات حفاظتی و کاهش خسارات ناشی از سیلاب در استان خوزستان فراهم آورد. همچنین توجه هم‌زمان به عوامل طبیعی و مدیریتی، مانند شبکه فاضلاب و شیوه دفع آب‌های سطحی، برای کاهش آسیب‌پذیری مناطق شهری ضروری است.

قدردانی

تمامی مولفین این پژوهش از سازمان زمین شناسی آمریکا برای فراهم نمودن داده‌های ماهواره‌ای مورد نیاز برای این تحقیق، تقدیر و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

مراجع

Abedini, M., Beheshti Javid, E., 2016. Flood Hazard Mapping of Lighvan Chai Watershed Using Network Analysis Process Model (ANP) and GIS. Geographic Space 16, 293-312. http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1682-en.html

Amiri, P., Arab-Amiri, A., Mahdis, H., 2018. Prioritization of Flood-proneness in Maharloo Watershed Sub-basins in Fars Province Using Morphometric Parameters and VIKOR Decision-Making Model. Ecohydrology 5, 827-813. https://doi.org/10.22059/ije.2018.244246.763

Chen, H., Chen, J., Guoru, W., 2021. Towards Better Flood Risk Management: Assessing Flood Risk and Investigating the Potential Mechanism Based on Machine Learning Models. Journal of Environmental Management 293, 112-128. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112810

Chen, Y., 2022. Flood Hazard Zone Mapping Incorporating Geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Analysis (MCA) Techniques. Journal of Hydrology 612, 128-268. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128268

Ganji, K., Gharechelou, S., Ahmadi, A., Alan Johnson, B., 2022. Riverine Flood Vulnerability Assessment and Zoning Using Geospatial Data and MCDA Method in Aq'Qala. International Journal of Disaster Risk Reduction 82, 103-345. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103345

Gholizadeh, E., Ghanoati, E., Afshar-Manesh, H., Pourhojat, A., 2017. Assessment of the Vulnerability of Riverine Cities and Their Coping Capacity against Floods (Case Study: Ahvaz Metropolis). Geographical Space 17, 227-245. https://doi.org/10.1142/S2345748123500173

Istak, A., Nibedita, D., Jatan, D., Moujuri, B., Shaswati, B., 2022. Flood Hazard Zonation Using GIS-based Multi-parametric Analytical Hierarchy Process. Geosystems and Geoenvironment 3, 100-250. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100250

Jokar Sarhangi, I., Esmaeili, R., Babaali Pour, S., 2018. Investigating the Relationship Between Geological and Topographic Factors with Drainage Density in Behrestagh Basin. Hydrogeomorphology 5, 135-156. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100250

Khaleghi, B., Razavi, S., Khamis, A., Karray, F., Kamel, M., 2009. Multisensor Data Fusion: Antecedents and Directions, 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS), Medenine, Tunisia, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/ICSCS.2009.5412296

Moradi, F., Azmoudeh Ardalan, A., Pahlavani, P., 2021. Site selection for Network Real-Time Kinematic stations on the South Coast using Fuzzy Analytic Hierarchy Process. Scientific-Research Quarterly of Geographical Information "Sepehr" 30, 19-32. https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.244448

Nasrin Nejad, N., Rangzan, K., Kalantari, N., Saberi, A., 2014. Flood hazard potential zonation of Baghan watershed using fuzzy analytic hierarchy process method (FAHP). Geospatial systems development 5, 15-34. https://sid.ir/paper/189464/fa. 34-15:(4)5

Nekouei, E., Wei, S., Baras, J., Skoglund, M., Johansson, K., 2019. Optimal Decision Fusion Under Order Effects. IFAC PapersOnLine 51, 53–60. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.022

Nguyen, D., Do, T., Van Nghiem, S., Ghimire, J., Dang, K., Giang, V., Vu, K., Pham, V., 2024. Flood Inundation Assessment of UNESCO World Heritage Sites Using Remote Sensing and Spatial Metrics in Hoi An City, Vietnam. Ecological Informatics 79, 102–427. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102427

Nikpour, N., Negarash, H., Fotouhi, S., Hosseini, S., Bahrami, Sh., 2019. Monitoring the trend of vegetation changes one of the most important indicators of land degradation (in Ilam province). Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards 5, 21-48. http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.4.21

Razmi, M., Asgari, H., Dadallahi-Sohrab, A., Nazemolsadat, S., Khazaei, S., 2017. Evaluation of the optimum index and MNDWI in examining coastline changes in the northern Persian Gulf (case study: Dayyer). Remote Sensing and GIS in Natural Resources 26, 52-65. https://dorl.net/dor/http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1396.8.1.4.7

Rostami, F., Tavakoli, M., Rostami, N., Ebrahimi, H., 2021. Investigation of Flood Hazard Potential in Watersheds Using AHP (Case Study: Ilam City Watershed). Comprehensive Watershed Management 1, 16-1. https://doi.org/10.22034/iwm.2021.247934

Saha, A., Agrawal, S., 2020. Mapping and Assessment of Flood Risk in Prayagraj District, India: A GIS and Remote Sensing Study. Nanotechnology for Environmental Engineering 5, 1-18. https://doi.org/10.1007/s41204-020-00073-1

Sajadi, M., Ahmadi, A., Bigdeli, B., 2020. Landslide hazard zonation based on fuzzy-analytical hierarchy process (FAHP) and Multi-criteria decision analysis (Case study: Marbar river basin). Journal of RS and GIS for Natural Resources 11, 2546 . https://dorl.net/dor/http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1399.11.4.2.2

Salehiyan Ghamsari, S., Arefi, H., Shah Hosseini, R., 2019. Change Detection in Urban Area Using Decision Level Fusion of Change Maps Extracted from Optic and SAR Images. Journal of Geomatics Science and Technology 8, 7190. http://dorl.net/dor/20.1001.1.2322102.1398.8.4.6.3

Sharifi Pichoun, M., Parnoun, F., 2017. Evaluation and Analysis of Geometric Changes in the Longitudinal and Cross-sectional Profiles of Ghareh Sou River During 1955-2014. Geography and Development 15, 60-43. https://doi.org/10.22111/gdij.2017.3030

Sharifi Pichoun, M., Parnoun, F., 2018. Evaluation and Spatial Analysis of Flooding in Ghareh Sou River Using Fuzzy Logic in GIS Environment. Natural Environmental Hazards 7, 17-30. https://doi.org/10.22111/jneh.2017.3203.

Taherizadeh, M., Niknam, A., Huy, T., Mezosi, G., Sarli, R., 2023. Flash Flood-risk Areas Zoning Using Integration of Decision-making Trial and Evaluation Laboratory, GIS-based Analytic Network Process

and Satellite-derived Information. Natural Hazards 118, 2309–2335. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06089-5

Yousefi Roshan, M., 2022. Estimation of Lake Urmia water area using Landsat 8 satellite imagery using MNDWI Index. Geography (Scientific Quarterly of the Iranian Geographical Society) 20, 165-186. https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.9.9

Yousefzadeh, A., Zeinali, B., Valizadeh Kamran, Kh., Asghari Saraskanroud, S., 2019. The Extraction of Flood Potential of Simineh River Basin Applying Satellite Images, Topographic Wetness Index and Morphological Features. Geography and Sustainability of Environment 9, 49-61. https://doi.org/10.22126/ges.2019.4294.2071

Ziyari, K., Rajaee, S., Darabkhani, R., 2021. Flood Zoning Using Hierarchical Analysis and Fuzzy Logic in GIS Case Study: Ilam City. Crisis Management 10, 21-30. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.