

A New Approach to Flood Risk Assessment: Integration of the Analytic Hierarchy Process and Sensitivity Analysis in the World Heritage Sites of Shushtar Historical City

Saeid amanpour^{1*}, Mahmud Abiyat²

1. Professor, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Literature and Humanities, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*E-mail: amanpour@scu.ac.ir

<https://orcid.org/0000-0001-9771-5632>

2. PhD Student in Geography and Urban Planning, Faculty of Literature and Humanities, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

<https://orcid.org/0000-0003-2060-0284>

Introduction

Flooding, as one of the most devastating natural disasters, is exacerbated by climate change and rapid urban development, highlighting the critical need for accurate risk assessment. Although modern technologies such as Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS), integrated with Multi-Criteria Decision-Making models like the Analytic Hierarchy Process (AHP), are effective tools for hazard zoning, the common practice of overlooking indicator collinearity and sensitivity analysis in previous studies has frequently undermined the validity and stability of the results. Furthermore, the historical city of Shushtar, situated along the Karun River and home to invaluable UNESCO World Heritage sites, is severely threatened by hydrological hazards. Therefore, this research aims to address these methodological shortcomings by employing a refined and innovative AHP framework integrated with statistical collinearity control and sensitivity analysis. The ultimate goal is to generate stable and integrated flood risk and vulnerability maps that provide effective, place-based protection and management strategies to enhance the resilience of Shushtar's historical fabric against future flood events.

Material and Methods

This applied, descriptive-analytical research focuses on the historical city of Shushtar in Khuzestan Province, which is highly exposed to flood risk due to its sensitive peninsular location between the two branches of the Karun River (Gargar and Shatit) and the presence of UNESCO World Heritage sites. For risk assessment, the MCDM-AHP model is employed based on expert opinions. This model incorporates key physical indicators (including elevation, slope, rainfall, and distance from the river) and socio-economic indicators (including population density and settlement density). The central methodological innovation involves the rigorous application of a multicollinearity test to modeling to ensure the statistical independence of the indicators, coupled with sensitivity analysis to confirm the stability of the results. Finally, the non-collinear layers are integrated within a GIS environment and classified using the Jenks Natural Breaks method to produce the final hazard and vulnerability maps.

Results and Discussion

The analysis of results emphasizes the strategic importance of protecting Shushtar's irreplaceable historical fabrics and demonstrates the high predictive capability of the MCDM-AHP model following rigorous statistical validations, including collinearity testing and sensitivity analysis. Findings indicate that topographic and hydrological factors—particularly elevation, slope, and drainage density—played the most dominant role in determining the Flood Hazard Index (FHI), consistent with regional and global studies. Conversely, the Flood Vulnerability Index (FVI) was primarily influenced by socio-economic and infrastructural factors, accounting for over 70% of the cumulative weight, which is critically important in urban and historical contexts. The model's accuracy, validated through metrics such as ROC-AUC, exceeded 90%, confirming its superiority and reliability compared with similar studies. These results can thus be transformed into a practical framework for Climate Adaptation Management, facilitating a shift from reactive to proactive protection strategies.

Conclusion

The present study successfully mapped flood risk zones in Shushtar using the robust GIS-AHP methodology with high precision, confirming that 11% of the total area falls within the Very High Flood Risk (FRZ) category, with the Sha'biyyeh Sharqi functional area identified as the most critical regional section. The high model accuracy (ROC-AUC > 90% and

MSE/RMSE < 40%) ensures the robustness of the findings and provides a crucial basis for future decision-making. Accordingly, a set of key operational recommendations is proposed, including: the prioritization of structural and non-structural protective measures for the 11% high-risk zones; the formal integration of FRZ/FVZ maps into comprehensive urban plans to prevent inappropriate development; the establishment of a local Early Warning System (EWS); and the formulation of policies aimed at reducing the vulnerability of critical infrastructure and managing population density near the river. Together, these measures are intended to sustainably protect UNESCO World Heritage sites against increasing climate-related threats.

Keywords: Flood, UNESCO World Heritage, MCDM-AHP, Flood resilience, Shushtar.

رویکردی نوین در ارزیابی ریسک سیل: تلفیق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل حساسیت در اماکن میراث جهانی شهر تاریخی شوشتر

سعید امانپور^{۱*}، محمود عبیات^۲

- ۱- استاد گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
۲- دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
* رایانامه نویسنده مسئول: Amanpour@scu.ac.ir

چکیده

سیلاب، به‌عنوان یکی از پیامدهای هیدرولوژیکی شدید ناشی از تغییر اقلیم، تهدیدی مکرر و مخرب برای اماکن میراث جهانی یونسکو شناخته می‌شود. تغییرات اقلیمی و توسعه شهری این تهدید را تشدید کرده است. شهر تاریخی - باستانی شوشتر، با دارابودن ۱۴ اثر ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی، یکی از مهم‌ترین اماکن میراث فرهنگی ایران به شمار می‌رود که به دلیل فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی، با خطرات ناشی از سیلاب‌های شدید و مکرر مواجه است. افزایش تاب‌آوری در برابر سیل به ابزاری حیاتی برای حفاظت از شهرها، به‌ویژه بافت تاریخی آن‌ها، در برابر این خطر تبدیل شده است؛ بنابراین، ارائه یک چارچوب ارزیابی ریسک برای افزایش تاب‌آوری و پشتیبانی از استراتژی‌های سازگاری در برابر این مخاطرات اقلیمی، هدف اصلی این مطالعه است. در این پژوهش، ۱۵ شاخص مستقل از هم (بدون چندخطی) با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی (MCDM-AHP) در محیط نرم‌افزار GIS، به‌منظور شناسایی مناطق بالقوه خطر سیل (FHZ)، مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل (FVZ) و مناطق با ریسک سیل (FRZ) در منطقه ترکیب شدند. نتایج نشان داد که بیش از ۳۲ درصد از کل مساحت منطقه در سطح خطر سیل بالا و بسیار بالا قرار دارد. نقشه FHZ منطقه با ROC-AUC بالای ۹۰ درصد و مقادیر MSE و RMSE کمتر از ۴۰ درصد، دقت و قابلیت اطمینان بالایی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تحلیل‌های حساسیت، نقش و اهمیت هر یک از شاخص‌ها را در مدل پیش‌بینی نشان می‌دهند که خود، زمینه‌ای بکر برای مطالعات بیشتر در منطقه فراهم می‌آورد. استحکام و اعتبار مدل، نتایج معقول و قابل اتکایی را ارائه داده و می‌تواند در تقویت استراتژی‌های مدیریت پایدار ریسک‌های اقلیمی جهت کاهش آن‌ها در سطوح مختلف مؤثر باشد. استراتژی‌های اتخاذشده در این پژوهش، پتانسیل بالایی برای استفاده در مطالعات مشابه در سایر مناطق دارند. در نهایت، این مطالعه می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را برای تصمیم‌گیرندگان، پژوهشگران، مدیران و توسعه‌دهندگان فعال در این منطقه، به‌ویژه در زمینه حفاظت از میراث فرهنگی در برابر پیامدهای تغییر اقلیم، فراهم آورد.

واژگان کلیدی: سیلاب، میراث جهانی یونسکو، MCDM-AHP، تاب‌آوری در برابر سیل، شوشتر

مقدمه

سیلاب به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین سوانح طبیعی، در سطح جهانی پیامدهای ناگواری از جمله تلفات جانی، خسارات گسترده به زیرساخت‌ها، زیان‌های اقتصادی چشمگیر و گسست‌های اجتماعی را به دنبال دارد (Rahmati et al., 2016a; Debnath et al., 2017). تشدید این خسارات در سال‌های اخیر، عمدتاً به تغییرات آب‌وهوایی، تخریب محیط‌زیست ناشی از توسعه شتابان شهری و مدیریت ناکارآمد کاربری اراضی نسبت داده می‌شود (Stefanidis and Stathis, 2013; Saha and Agrawal, 2020). ارزیابی و پیش‌بینی ریسک سیل، با تمرکز بر تحلیل و پیش‌بینی جامع مؤلفه‌های مخاطره، میزان قرارگیری در معرض سیل و آسیب‌پذیری در برابر آن، نقشی حیاتی در کاهش خطرات و حفاظت از شهرها ایفا می‌کند (Arrighi, 2021; Figueiredo et al., 2020; Vojinovic et al., 2016). با این وجود، بسیاری از سیاست‌های حفاظتی جهانی، هنوز تحلیل جامع و ترکیبی از این سه مؤلفه را به طور دقیق در نظر نگرفته‌اند (United Nations, 2023). برای تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری شهرها، استفاده از روش‌های نوین از اهمیت بالایی برخوردار است. فناوری‌های سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، به همراه مدل‌های هیدرولوژیکی، به ابزاری قدرتمند برای مشاهده، تحلیل و ارزیابی ریسک تبدیل شده‌اند (Gerster et al., 2022; Ghawana et al., 2021; Zhang et al., 2022). جغرافی‌دانان و پژوهشگران با بهره‌گیری از داده‌های مکانی متنوع، تجربیات تاریخی بلایا، و ادغام سنجش از دور با سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS (GIS-MCDM)، مکان‌ها را اولویت‌بندی کرده و اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه را باهدف کاهش هزینه‌ها و خطرات ناشی از بلایایی چون سیل اجرا می‌کنند (Bunmi Mudashiru et al., 2022; Eghtesadifard et al., 2020; Farhadi et al., 2022). این متخصصان بر ضرورت رفع چالش‌های موجود در تحلیل ریسک تأکید دارند؛ چالشی که ناشی از عدم توجه کافی به احتمال وقوع، میزان قرارگیری در معرض، و آسیب‌پذیری‌های محیطی است، درحالی‌که این ویژگی‌های خطرناک با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای قابل شناسایی هستند (Agapiou, 2021; Agapiou and Lysandrou, 2022; Chen et al., 2022). در نهایت، تولید نقشه‌های حساسیت به سیل‌گیری و سوابق تاریخی نقشی حیاتی در پایش تأثیرات بلایا و پیش‌بینی روندهای آتی داشته و اطلاعات مکانی ضروری را برای آمادگی، پاسخ و بازیابی فراهم می‌کنند که این امر در مواجهه با افزایش شدت بلایای هیدرولوژیکی اهمیت دوچندانی یافته است (Lin and Billa, 2021; Pham et al., 2021).

رودخانه کارون، به‌عنوان بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه ایران، با تأمین بیش از ۱۵ درصد جریان‌های سطحی کشور، در طول زمان دچار تغییراتی نظیر کاهش عرض بستر و شکل‌گیری جزایر رسوبی (سدهای ماسه‌ای) شده است؛ این جزایر به‌ویژه در مناطق شهری، عملکرد طبیعی رودخانه را مختل کرده و خطر وقوع سیلاب‌های مخرب را به هنگام پرآبی افزایش می‌دهند (Saffari, 2023). شهر تاریخی شوشتر به دلیل عبور کارون از میان آن، همواره در معرض خطر سیل قرار دارد و بافت تاریخی ارزشمند آن شامل ۱۳ اثر ثبت جهانی یونسکو و بیش از ۲۶۰ اثر ثبت ملی (Sheikhinia, 2020; UNESCO, 2023)، در برابر مخاطراتی چون رانش زمین و به‌خصوص سیل آسیب‌پذیر است (Rostami et al, 2021; Shahsavari, 2023). تجربه سیل فروردین ۱۳۹۸ که محوطه آثار تاریخی را نیز درگیر ساخت (Voice of Heritage, 2019) اهمیت حیاتی ارزیابی دقیق خطر سیل و شناسایی مناطق مستعد را برای مدیریت پایدار سیلاب‌ها دوچندان کرده است (Degiorgis et al., 2012; Radwan et al., 2019; Debnath et al., 2022). محققان برای پهنه‌بندی خطر سیل از ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با رویکردهای گوناگون استفاده می‌کنند (Pradhan and Lee, 2010; Chen et al., 2011). این روش‌ها شامل سه دسته اصلی هستند:

۱. مدل‌های دو متغیره مانند وزن شواهد (WoE) و نسبت فراوانی (FR) که به داده‌های تاریخی سیلاب متکی‌اند (Khosravi et al., 2016; Sarkar et al., 2022).

۲. مدل‌های یادگیری ماشین (ML) شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، رگرسیون لجستیک (LR) و ماشین بردار پشتیبان (SVR) که دقت بالایی در شناسایی الگوهای پیچیده دارند؛ برای مثال، مدل‌های ANN و SVR بهینه‌سازی شده، کارایی چشمگیری در پیش‌بینی سیل در مناطق مختلف ایران نشان داده‌اند (Bakhtiari et al, 2022; Salvati et al, 2023).

۳. مدل‌های چندمعیاره (MCDM) مانند فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که به دلیل توانایی در ترکیب داده‌های کمی، کیفی و نظرات کارشناسان برای پهنه‌بندی خطر سیل بسیار محبوب هستند (Mekonnen et al., 2023). بااین‌حال، کاربرد مدل AHP در مطالعات

پیشین با چالش‌های مهمی نظیر هم‌خطی (Collinearity) بین شاخص‌ها و نبود تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) همراه بوده است که می‌تواند اعتبار و پایداری نتایج را کاهش دهد (Li et al., 2019). مطالعات موردی نیز بر اهمیت انتخاب مدل مناسب بر اساس شرایط منطقه‌ای تأکید دارند، مانند دقت بالاتر مدل هیدرولوژیکی L-THIA نسبت به ANN در خراسان رضوی (Zanganeh Asadi et al., 2021).

پژوهش حاضر باهدف غلبه بر محدودیت‌های روش‌های پیشین (هم‌خطی و عدم تحلیل پایداری)، یک چارچوب متدولوژیک پیشرفته و متمایز را ارائه می‌دهد. نوآوری اصلی این تحقیق، تلفیق مدل MCDM-AHP با کنترل آماری هم‌خطی و تحلیل حساسیت است. این رویکرد تضمین می‌کند که نقشه‌های خطر تولید شده نه تنها بر اساس عوامل محیطی و انسانی معتبر وزن‌دهی شده‌اند، بلکه در برابر عدم قطعیت نظرات کارشناسی نیز پایداری لازم را دارند. این سطح از دقت روش‌شناختی در یک بستر تاریخی و حساس، ضرورت انجام تحقیق را توجیه می‌کند.

هدف اصلی این تحقیق، تهیه نقشه‌های خطر، آسیب‌پذیری و ریسک سیل به‌منظور پشتیبانی از برنامه‌ریزی‌های سازگاری و حفاظت از بافت تاریخی و میراث جهانی شوشتر در برابر این مخاطرات اقلیمی است. اهداف اختصاصی شامل:

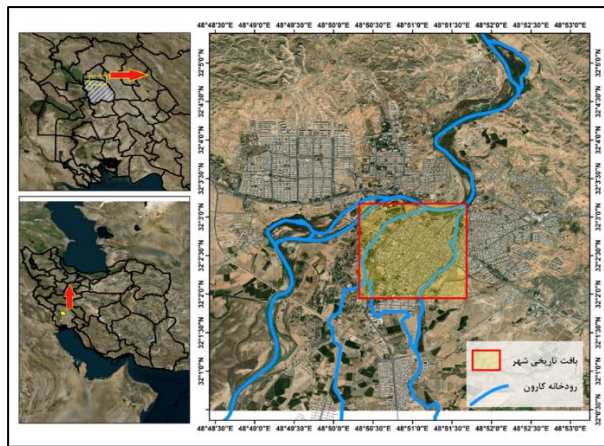
- اعتبارسنجی شاخص‌ها: حذف اثر هم‌خطی بین معیارهای مؤثر محیطی و انسانی برای تضمین استقلال آماری در فرایند وزن‌دهی.
- پهنه‌بندی ریسک تلفیقی: تهیه نقشه‌های یکپارچه خطر، میزان قرارگیری و آسیب‌پذیری با تمرکز بر آسیب‌پذیری میراث فرهنگی.
- تحلیل پایداری نتایج: استفاده از تحلیل حساسیت برای اطمینان از اعتبار و پایداری نقشه‌های ریسک نهایی.
- ارائه راهکارهای سازگاری: پیشنهاد اقدامات حفاظتی و مدیریتی مبتنی بر مکان برای تاب‌آوری بافت تاریخی شهر شوشتر.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های شهر شوشتر

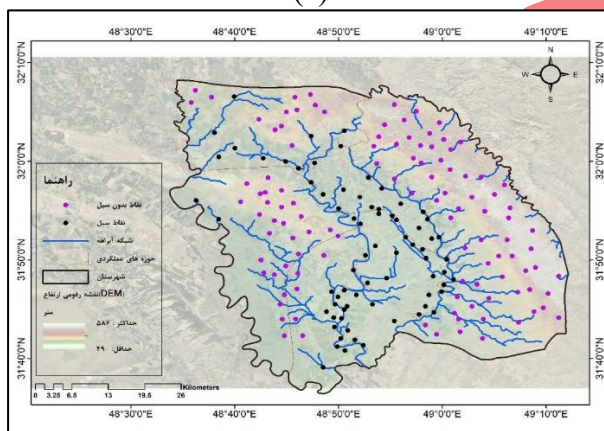
شهر شوشتر در بخش مرکزی شهرستان شوشتر واقع شده و بر اساس آخرین سرشماری در سال ۱۳۹۵، جمعیتی برابر با ۱۰۱,۸۷۸ نفر دارد. این شهر از نظر جغرافیایی بین طول شرقی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۲ دقیقه از نصف‌النهار گرینویچ و عرض شمالی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۶ دقیقه از خط استوا قرار گرفته است (Statistical Centre of Iran, 2016). رودخانه کارون در نزدیکی شهر شوشتر به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شود: **رودخانه گرگر**: این شاخه، مرز شرقی شهر را تشکیل می‌دهد. **رودخانه شطیپ**: این شاخه، مرز غربی شهر را تشکیل می‌دهد. این دو شاخه پس از آبیاری زمین‌های کشاورزی در دشت شوشتر، مجدداً در نزدیکی سد گتوند (نه سد گهر) به یکدیگر می‌پیوندند (Shahsavari et al., 2012).

شهر شوشتر دارای اقلیمی گرمسیری با مشخصه تابستان‌های طولانی و بسیار گرم و زمستان‌های نسبتاً معتدل تعریف می‌شود. بر اساس سالنامه آماری سال ۱۴۰۲ مجموع بارندگی سالانه این شهر ۳۸۲ میلی‌متر، میانگین دما حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت ۳۸/۵ درصد گزارش شده است. شایان ذکر است جهت تهیه نقشه بارندگی، از اطلاعات سالانه ۸ ایستگاه هواشناسی اطراف منطقه مورد مطالعه بهره گرفته شده است (Statistical Centre of Iran, 2023). با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبل می‌توان بیان نمود که موقعیت شبه‌جزیره‌ای شوشتر و عبور رودخانه کارون از آن، شهر را در برابر مخاطرات طبیعی، به ویژه سیل، آسیب‌پذیر ساخته است. این تهدید، عمدتاً در فصول بارانی و به دلیل تغییر کاربری اراضی در شهر و مناطق اطراف آن، تشدید می‌شود.



(الف)

(a)



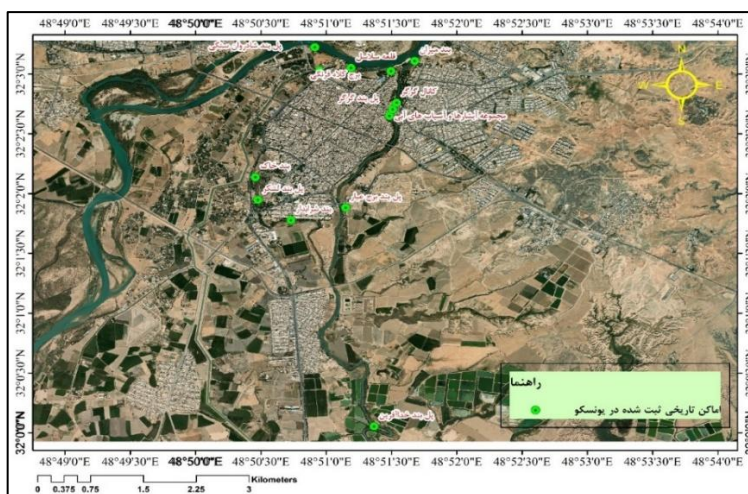
(ب)

(b)

شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی شهر شوشتر در استان خوزستان و موقعیت بافت تاریخی شهر و ب) نقشه رخدادهای سیل در شهرستان

Fig 1. a) Geographical location of Shushtar City in Khuzestan Province and the location of the City's historical fabric, and b) Flood events map of Shushtar County

شوشتر، شهری باستانی و دژ ماند، در فاصله حدود ۹۲ کیلومتری (۵۷ مایلی) شمال اهواز، مرکز استان خوزستان، واقع شده است. این شهر، به خاطر سیستم آبیاری منحصر به فرد خود که بر روی بند قیصر، به عنوان اولین پل/سد ایران، بنا شده، از دیرباز در کشاورزی بسیار پیشرفته بوده است. این سیستم آبیاری که به «سیستم هیدرولیک تاریخی شوشتر» شهرت دارد، شامل ۱۳ محوطه تاریخی مرتبط به هم است (Vogel, Alexius 1987).



شکل ۲. موقعیت اماکن تاریخی ثبت شده در سازمان یونسکو در شهر شوشتر

Fig 2 - Location of historical sites registered in UNESCO in Shushtar city

موقعیت شبه جزیره ای شوشتر و عبور رودخانه کارون از آن، شهر را در برابر مخاطرات طبیعی، به ویژه سیل، آسیب پذیر ساخته است. این تهدید، عمدتاً در فصول بارانی و به دلیل تغییر کاربری اراضی در شهر و مناطق اطراف آن، تشدید می شود.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع کاربردی و با روش توصیفی - تحلیلی انجام شده است. گردآوری اطلاعات بر اساس مطالعات کتابخانه ای و پرسش نامه صورت گرفته است. جامعه آماری پژوهش، کارشناسان مرتبط با حوزه های شهرسازی، منابع طبیعی، آب و فاضلاب، محیط زیست و سایر نهادهای رسمی مرتبط با شهر شوشتر می باشند. در این تحقیق، برای اجتناب از تأثیر نظرات شخصی و خطاهای سلیقه ای، تعیین و وزن معیارها با استفاده از نظرات متخصصین انجام شده است. انتخاب شاخص ها در این پژوهش بر مبنای مطالعات گسترده و معتبر در حوزه ارزیابی ریسک و آسیب پذیری سیل صورت گرفته است. این شاخص ها به دو دسته اصلی عوامل فیزیکی و عوامل اجتماعی - اقتصادی تقسیم می شوند. هر یک از این شاخص ها بر اساس نقش و تأثیرشان در افزایش یا کاهش خطر سیل خیزی و آسیب پذیری در برابر سیل انتخاب شده اند. عوامل فیزیکی، این دسته از شاخص ها به ویژگی های طبیعی و توپوگرافی منطقه مربوط می شوند که به طور مستقیم بر دینامیک، شدت و گسترش سیلاب تأثیر می گذارند که شامل ارتفاع، ارتفاع یک عامل اساسی در تعیین خطر سیل است. مناطق با ارتفاع کمتر، به دلیل تجمع آب و جریان های سطحی، بیشتر در معرض سیل قرار دارند (Ahmed et al., 2022; Gupta and Dixit, 2022). شیب، شیب زمین سرعت و حجم جریان رواناب را کنترل می کند. مناطق با شیب کمتر، به دلیل کندی جریان آب، بیشتر مستعد سیلاب هستند (Debnath et al., 2023). تراکم زهکشی، این شاخص توانایی یک حوضه آبریز را در تخلیه رواناب نشان می دهد. مناطق با تراکم زهکشی پایین تر، پتانسیل بیشتری برای تجمع آب و وقوع سیل دارند (Onus, Iuel Gül, 2013; Kumar et al., 2016). فاصله از رودخانه، نزدیکی به رودخانه ها به طور مستقیم با خطر سیل مرتبط است. هرچه فاصله از رودخانه کمتر باشد، احتمال طغیان و وقوع سیل افزایش می یابد (Chapi et al., 2017; Saber et al., 2022). شاخص رطوبت توپوگرافی، این شاخص پتانسیل تجمع آب در یک نقطه را نشان می دهد. مقادیر بالای این شاخص نشان دهنده مناطق اشباع شده و مستعد سیل است (Beven and Kirkby, 1979; Rahmati et al., 2016). بارندگی، بارندگی، اصلی ترین محرک هیدرولوژیکی وقوع سیلاب است و به عنوان یک عامل مستقیم در مدل سازی خطر سیل گنجانده می شود (Gupta and Dixit, 2022). انحنا، انحنا، زمین، انحنا، مقعر و صاف توپوگرافی می تواند باعث تجمع جریان سطحی شود و به همین دلیل پتانسیل سیل را افزایش می دهد (Ahmed et al., 2022; Debnath et al., 2022). تراکم خطواره، وجود شکستگی ها و خطواره ها می تواند بر نفوذپذیری زمین تأثیر بگذارد و در شرایط بارش شدید، موجب افزایش رواناب سطحی و سیل خیزی شود (Jahan et al., 2019; Arnous et al., 2022). جهت شیب، این شاخص جهت حرکت رواناب را مشخص می کند. سطوح با جهت شیب صاف یا مسطح، پتانسیل بیشتری برای تجمع آب و وقوع سیلاب دارند (Aryal et al., 2003; Bui et al., 2019). کاربری زمین و پوشش زمین، نوع کاربری زمین (مانند مناطق شهری، جنگل ها، زمین های کشاورزی) بر نفوذپذیری خاک و سرعت رواناب تأثیر می گذارد. به عنوان مثال،

مناطق شهری به دلیل وجود سطوح نفوذناپذیر، خطر سیل بالاتری دارند (Lahon et al., 2023). در خصوص عوامل اجتماعی و اقتصادی، این شاخص‌ها میزان تأثیر سیل بر جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و دارایی‌ها را منعکس می‌کنند که شامل تراکم جمعیت، مناطق پرجمعیت به دلیل تمرکز بالای انسان‌ها، سازه‌ها و دارایی‌ها، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر سیل دارند (Tapsell et al., 2002; Roy et al., 2021). تراکم سکونتگاه‌ها، مشابه تراکم جمعیت، تراکم بالای سکونتگاه‌ها نشان‌دهنده تمرکز زیرساخت‌ها است که در صورت وقوع سیل، خسارات مالی و جانی بیشتری را به دنبال دارد. فاصله از شبکه راه‌ها و مراکز بهداشتی و درمانی، نزدیکی به این زیرساخت‌های حیاتی، قابلیت دسترسی به امداد رسانی و خدمات اورژانسی را در شرایط سیل بهبود می‌بخشد و آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد (Chen et al., 2013; Mitra et al., 2022). تراکم راه‌ها، تراکم بالاتر راه‌ها به معنای دسترسی بهتر و امکان تخلیه سریع‌تر مناطق در معرض خطر است که نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری دارد (Kittipongvises et al., 2020). انتخاب تمامی شاخص‌های ذکر شده، بر اساس نقش تأییدشده آن‌ها در ادبیات علمی و همخوانی با ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، صورت گرفته است. این رویکرد تضمین می‌کند که تمامی عوامل کلیدی دخیل در خطر و آسیب‌پذیری سیل به صورت جامع مورد ارزیابی قرار گیرند. در ادامه کار عوامل خطر سیل و آسیب‌پذیری به صورت زوجی در قالب پرسش‌نامه‌ای بین کارشناسان توزیع شدند که نتایج عوامل غالب و ماتریس زوج به زوج زیرمجموعه‌های آنها، رتبه‌بندی و ضریب سازگاری (CR) مربوطه در (جدول ۶ و ۷) شرح داده شده است. در این تحقیق، عوامل مؤثر بر مخاطرات و آسیب‌پذیری سیل، آزمون هم‌خطی چندگانه، اعتبارسنجی و ارزیابی دقت نقشه خطر سیل بررسی و تحلیل می‌شوند. سپس تمامی شاخص‌های بدون هم‌خطی چندگانه که برای مناطق با خطر سیل (FHZ) و مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل (FVZ) حیاتی هستند، بادقت در نرم‌افزار GIS تلفیق می‌شوند. لایه‌های موضوعی کمی با استفاده از روش شکست طبیعی جنکس^۲ طبقه‌بندی می‌شوند، به‌استثنای پارامترهای کیفی (Jenks, 1967; Pathan et al., 2022; Debnath et al., 2023). در این مطالعه، تنها عواملی که مشکل هم‌خطی چندگانه ندارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بخش‌های بعدی به تفصیل توضیح داده می‌شوند. علاوه بر این، تحلیل حساسیت برای عوامل تعیین‌کننده خطر و آسیب‌پذیری سیل انجام شده است. روش‌شناسی مبتنی بر MCDM-AHP (تصمیم‌گیری چندمعیاره - فرایند تحلیل سلسله مراتبی) به کار رفته در این مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. مدل مفهومی پژوهش
Fig 3. Conceptual model of the research

روش‌های تعیین مناطق با خطر سیل^۳ (FRZ)

این مطالعه به طور گسترده دو ارزیابی کلیدی را در نظر گرفته است: پارامترهای مؤثر بر خطر سیل و پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری سیل. پارامترهای این کار از مطالعات علمی قبل استفاده شده است (Gupta and Dixit, 2022; Mitra et al., 2022; Debnath et al., 2023).

* رویکردهای تدوین پارامترهای منطقه با خطر سیل^۴ (FHZ): لایه‌های موضوعی آماده شده مربوط به عوامل مختلف شامل: ارتفاع^۵ (EL)، شیب^۶ (SL)، مجموعه داده‌های SRTM (مأموریت توپوگرافی راداری شاتل) با وضوح فضایی ۳۰ متر از DEM (مدل رقومی ارتفاع) برای ایجاد نقشه ارتفاع و شیب منطقه مورد استفاده قرار گرفت که به ترتیب در شکل (۴-الف و ۴-ب) نشان داده شده است. تراکم زهکشی^۷ (DD) جهت تهیه این نقشه با تقسیم کل طول رودخانه‌ها در یک سلول بر مساحت آن سلول خاص در نرم افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد (شکل ۴-پ) (Kotecha et al., 2023; Debnath et al., 2023; Altaf et al., 2013). فاصله از رودخانه^۸ (DFR) نقشه فاصله از رودخانه منطقه از طریق رویکرد تراکم خطی توسعه داده شد (شکل ۴-ت). شاخص رطوبت توپوگرافی^۹ (TWI) منطقه مورد مطالعه در شکل (۴-ث) نشان داده شده است، که با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۱) محاسبه شده است، که توسط مور^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۱) استفاده شده است.

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad (1)$$

در اینجا، A و β به ترتیب حوزه آبریز منطقه و زاویه شیب منطقه اشاره دارند. هرچه مقدار این شاخص (TWI) پایین‌تر باشد، خطر سیل کمتر است. کاربری زمین و پوشش زمین^{۱۱} (LULC) برای مطالعه حاضر با استفاده از طبقه‌بندی جنگل تصادفی (الگوریتم یادگیری ماشین) در محیط ArcGIS 10.8 تهیه شده است و به پنج دسته طبقه‌بندی شده است (شکل ۴-ج). برای تهیه نقشه، از تصاویر Landsat-8 OLI با وضوح فضایی ۳۰ متر برای سال ۲۰۲۴ استفاده شده است. ماهیت پویای LULC به طور مداوم بر پاسخ‌های هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد و منجر به وقوع سیل می‌شود (Sanyal et al., 2014; Mojaddadi et al., 2017; Das and Gupta, 2020; Vivekananda et al., 2021; Hishe et al., 2021). دقت کلی این نقشه ۸۱/۳۳ درصد است. مقادیر دقت برای این نقشه با استفاده از روابط زیر (روابط ۲ تا ۵) به ترتیب محاسبه می‌شوند.

$$User\ accuracy(\%) = \ln\left(\frac{x_{kk}}{x_{k+}}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$Producer\ accuracy(\%) = \ln\left(\frac{x_{kk}}{x_{+k}}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$Overall\ accuracy(OA) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^r n_i \quad (4)$$

$$Kappa\ coefficient(K) = \frac{N \sum_{k=1}^r x_{kk} - \sum_{k=1}^r (x_{k+} + x_{+k})}{N^2 - \sum_{k=1}^r (x_{k+} + x_{+k})} \quad (5)$$

که در اینجا، N نشان‌دهنده تعداد کل پیکسل‌ها است؛ r تعداد کلاس‌ها و x_{kk} مجموع پیکسل‌ها در سطرهای "k" و ستون‌های "k" است، به ترتیب. در ماتریس خطا، کل نمونه‌ها در ستون "k" با اشتراک x_{+k} نشان داده می‌شوند، در حالی که کل نمونه‌ها در سطر "k" با x_{k+} نشان داده می‌شوند. میانگین بارندگی^{۱۲} (RF): روش وزن‌دهی معکوس فاصله‌ای^{۱۳} (IDW) با تولید یک سطح پیوسته (هموار) بارش از یک نقطه هدف، به بهبود فرایندهای تصمیم‌گیری یاری می‌رساند. این روش درون‌یابی، با فرض کاهش تأثیر نقاط دورتر بر مقدار تخمینی در نقطه هدف، مقادیر بارش را بر اساس وزن‌دهی معکوس فاصله‌ای نقاط معلوم مجاور، درون‌یابی می‌کند. جهت تهیه نقشه

⁹ Topographic Wetness Index

¹⁰ Moore

¹¹ Land Use/ Land Cover

¹² Rainfall

¹³ Inverse distance weight

³ flood risk zone

⁴ flood hazard zone

⁵ Elevation

⁶ Slope

⁷ Drainage density

⁸ Distance from river

بارندگی منطقه مورد مطالعه، از اطلاعات بارندگی سالانه ۸ ایستگاه هواشناسی اطراف منطقه مورد مطالعه استفاده شد. (سازمان هواشناسی استان خوزستان). توزیع میانگین بارندگی (RF) منطقه از ۲۶۶ تا ۳۴۷ میلی متر متغیر است (شکل ۴-ج). **انحنای زمین**^{۱۴} (CU) (شکل ۴-ح) نقشه انحنای منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. تراکم خطواره^{۱۵} (LD) این لایه با استفاده از قابلیت های سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) تولید گردید. داده های حاصل از سازمان زمین شناسی در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. (شکل ۴-خ). جهت شیب^{۱۶} (AS) که در این بخش نیز از مدل رقومی ارتفاع (SRTM-DEM) برای منطقه مطالعاتی استفاده شد (شکل ۴-د).

رویکردهای تدوین پارامترهای منطقه آسیب پذیر در برابر سیل (FVZ)

ارزیابی آسیب پذیری سیل شامل در نظر گرفتن طیف وسیعی از عوامل اجتماعی - اقتصادی و زیرساختی است که به ایجاد خطر در یک منطقه کمک می کند (Gupta and Dixit, 2022; Bhuyan et al., 2023).

تراکم جمعیت^{۱۷} (PD) جهت تهیه این نقشه از آخرین اطلاعات سرشماری در سال ۱۳۹۵ تا سطح روستا استفاده شده است (شکل ۵-الف) و با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۶) محاسبه شده است.

$$PD = \frac{N}{A} \quad (6)$$

که در آن PD: تراکم جمعیت، N: تعداد کل جمعیت و A: مساحت کل

تراکم سکونتگاه ها^{۱۸} (SD) جهت ایجاد این نقشه از تابع تراکم کرنل^{۱۹} در نرم افزار GIS سکونتگاه های انسانی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۵-ب). فاصله از شبکه راه ها^{۲۰} (DFRN) و مراکز بهداشتی و درمانی^{۲۱} (DTHC) داده های مربوط به فاصله از شبکه جاده ای و فاصله تا مراکز بهداشتی و درمانی برای منطقه مورد مطالعه از سایت OpenStreetMap جمع آوری و جهت صحت سنجی این اطلاعات با داده های دریافتی از اداره کل راه و شهرسازی (برای شبکه راه های موجود) و اطلاعات دریافتی از دانشگاه جندی شاپور اهواز (از موقعیت مراکز بهداشتی و درمانی استان) استفاده شد. جهت تهیه لایه های مربوطه با استفاده از روش فاصله اقلیدسی^{۲۲} در نرم افزار ArcGIS به ترتیب آماده شدند (Chen et al., 2013; Mitra et al., 2022; Peng and Zhang, 2022) و به پنج طبقه دسته بندی شدند (شکل ۵-پ و ۵-ت) و **تراکم راه ها**^{۲۳} (RD) که جهت ایجاد این نقشه از تابع تراکم کرنل^{۲۴} در نرم افزار ArcGIS برای راه های منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۵-ث).

روش تشخیص همبستگی خطی چندگانه^{۲۵} برای عوامل خطر و آسیب پذیری سیل

همبستگی خطی چندگانه

به همبستگی خطی بین متغیرهای مستقل اشاره دارد و وجود آن نتایج مبهمی را به همراه دارد (Jong, 2019) روش های مختلفی برای تشخیص همبستگی خطی چندگانه قبل از اجرای یک مدل خاص در مطالعات سیل وجود دارد (Ahmed et al., 2022; Saber et al., 2022). در این مطالعه، از روش های تحمل^{۲۶} و ضریب تورم واریانس^{۲۷} (VIF) برای بررسی همبستگی خطی چندگانه بین ۱۰ عامل مؤثر بر خطر سیل و ۵ عامل مؤثر بر آسیب پذیری سیل استفاده شده است (Mitra et al., 2022; Debnath et al., 2023). مقادیر VIF بزرگ تر از ۹ و سطوح تحمل کمتر از ۰.۱ برای هر یک از متغیرهای مؤثر بر سیلاب، حاوی مسائل هم خطی چندگانه هستند (Khosravi et al., 2018)؛ بنابراین، حذف همه عوامل دارای مشکلات همبستگی خطی چندگانه قبل از مدل سازی توصیه می شود (Mitra et al., 2022).

²²² Euclidian distance

²³ road density

²⁴ kernel density

²⁵ Multicollinearity

²⁶ Tolerance

²⁷ Variance Inflation Factor

¹⁴ curvature

¹⁵ lineament density

¹⁶ Aspect

¹⁷ population density

¹⁸ settlement density

¹⁹ kernel density

²⁰ distance from road network

²¹ distance to health & clinic

(Debnath et al., 2023). مقادیر تحمل و VIF برای عوامل انتخاب شده خطر و آسیب‌پذیری سیل با استفاده از روابط زیر (روابط ۷ و ۸) محاسبه شده است.

$$T_i = 1 - R_i^2 \quad (7)$$

$$VIF_i = \frac{1}{T_i} \quad (8)$$

در اینجا، T_i نشان‌دهنده مقدار تحمل متغیر پیش‌بینی‌کننده i ام، VIF_i نشان‌دهنده ضریب تورم واریانس برای متغیر پیش‌بینی‌کننده i ام و R_i^2 ضریب تعیین برای مدل رگرسیون را تعریف می‌کند.

MCDM-AHP²⁸ برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی

روش‌های MCDM نقش حیاتی در ساختاردهی و حل چالش‌های برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری دارند که با عوامل متعددی همراه هستند. این روش‌ها به تصمیم‌گیران در مواجهه با چنین پیچیدگی‌هایی کمک ارزشمندی ارائه می‌دهند. اغلب، این چالش‌ها فاقد یک راه‌حل بهینه واحد هستند که بر اهمیت گنجاندن دیدگاه‌های تصمیم‌گیرندگان برای تمایز بین گزینه‌های بالقوه تأکید دارد (Majumder, 2015). فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) که توسط ساعتی (۱۹۸۰) معرفی شد، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) است. هدف آن کمک به تصمیم‌گیری از طریق ادغام داده‌های موجود و نظرات متخصصان است (Tercan et al., 2022). با توجه به اینکه قضاوت‌های انسانی گاهی اوقات ممکن است دارای ناسازگاری باشند، رویکرد AHP با استفاده از مقایسه‌های زوجی²⁹ به جای ارزیابی مستقیم امتیازات و وزن‌ها، این عدم دقت‌ها را کاهش می‌دهد (Nasiri et al., 2022; Romero-Ramos et al., 2023).

اهمیت این روش در ارزیابی حساسیت، آسیب‌پذیری و پهنه‌بندی خطر سیل افزایش یافته و به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به‌عنوان چارچوبی برای تعیین وزن و رتبه‌بندی پارامترها عمل می‌کند (Saaty, 1980; Gupta and Dixit, 2022; Mitra et al., 2022; Debnath et al., 2023). در این مطالعه، از روش MCDM-AHP برای ادغام لایه‌های موضوعی انتخاب شده برای خطر سیل و آسیب‌پذیری استفاده شده است (Mitra et al., 2022)؛ بنابراین، وزن‌های نسبی هر لایه موضوعی به صورتی تکی و زیرمجموعه‌های آن‌ها برای عوامل خطر و آسیب‌پذیری سیل از طریق ماتریس‌های مقایسه زوجی³⁰ اختصاص داده شده است. وزن‌های نسبی بر اساس مقیاس ساعتی (Saaty, 1980) محاسبه شده است که از ۱ تا ۹ متغیر است و در جدول ۲ نشان داده شده است. علاوه بر این، این روش به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر دانش شناخته می‌شود (Mukherjee and Singh, 2020; Mitra et al., 2022). نویسندگان با یک مرور جامع ادبیات (Gupta and Dixit, 2022; Mitra et al., 2022; Debnath et al., 2023) و تکیه بر اجماع نظرات پنج نفره از کارشناسان متخصص در حوزه‌های شهرسازی، منابع طبیعی، آب و فاضلاب، محیط زیست، وزن‌ها را برای هر پارامتر اختصاص دادند. برای تجمیع قضاوت‌های فردی کارشناسان و استخراج وزن‌های نهایی معیارها، از روش میانگین هندسی استفاده شد. در تکنیک AHP، یک ماتریس مربعی $A = (a_{ij})$ برای مقایسه زوجی n معیار از پارامترهای خطر و آسیب‌پذیری سیل تهیه می‌شود. برای تخمین a_{ij} عناصر ماتریس، از رابطه زیر (رابطه ۹) استفاده می‌شود.

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (9)$$

ماتریس‌های مقایسه زوجی نقش مهمی در ارزیابی ریاضی ایفا می‌کند که در آن معکوس هر مقدار پارامتر باید در نظر گرفته شود. در اینجا، a_{ij} از یکنواختی پیروی می‌کند، یعنی $a_{ij} = \frac{P_i}{P_j}$ ؛ که در آن P_i نشان‌دهنده انتخاب جایگزین مربوطه i است، همانطور که در رابطه روبرو ذکر شده است.

²⁹ pairwise comparisons

³⁰ pair-wise comparison matrices

$$A = \begin{pmatrix} \frac{P_1}{P_1} & \dots & \frac{P_1}{P_j} & \dots & \frac{P_1}{P_n} \\ \frac{P_i}{P_1} & 1 & \dots & 1 & \dots & \frac{P_i}{P_n} \\ \frac{P_n}{P_1} & \dots & \frac{P_n}{P_j} & \dots & \frac{P_n}{P_n} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ماتریس مقایسه زوجی عوامل مؤثر بر خطر سیل و آسیب‌پذیری در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. مراحل مختلفی برای اختصاص وزن‌های نسبی یا رتبه‌بندی به هر پارامتر از ماتریس مقایسه زوجی دنبال شده است.

گام ۱. محاسبه مجموع تمام پارامترها برای ستون j در ماتریس A با استفاده از رابطه (۱۱).

$$\frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_i}{P_j} + \dots + \frac{P_n}{P_j} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j} \quad (11)$$

گام ۲. برآورد مقدار نرمالیزه یعنی، $a_{ij} = P_i/P_j$ برای عوامل مؤثر با استفاده از فرمول (رابطه ۱۲).

گام ۳. اختصاص وزن یا رتبه (W_i) به هر سطر با استفاده از میانگین پارامترها، با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\frac{\frac{P_i}{P_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_j}} = \frac{P_i}{P_j} \times \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (12)$$

برای اطمینان از دقت و توانایی دیدگاه‌های منطقی کارشناسان در ماتریس مقایسه زوجی، محاسبه CR (نسبت سازگاری^{۳۱}) از اهمیت بالایی برخوردار است (Mitra et al., 2022; Debnath et al., 2023). قبل از محاسبه CR، باید شاخص سازگاری (CI) و شاخص تصادفی^{۳۲} (RI) را محاسبه کرد. CI با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه شد.

$$W_i = \left(\frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} + \dots + \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \times \frac{1}{n} \quad (13)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

که در آن λ_{max} به بزرگترین مقدار ویژه اشاره دارد؛ n تعداد شاخص‌های انتخاب شده است و با استفاده از رابطه زیر (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left(w_i \times \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \quad (15)$$

نسبت سازگاری (CR) برای هر زیر پارامتر و پارامتر با استفاده از رابطه (۱۶) ارزیابی شد و باید کمتر از ۰/۱۰ باشد (Saaty, 1980; Gupta and Dixit, 2022). در غیر این صورت، کل مراحل ریاضی برای حفظ سازگاری در نتیجه باید تجدید نظر شود (Debnath et al., 2023).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (16)$$

که در آن CR نشان‌دهنده نسبت سازگاری، CI نشان‌دهنده شاخص سازگاری و RI نشان‌دهنده شاخص سازگاری تصادفی است (Saaty, 1988) که مقادیر ثابتی را ارائه می‌دهد (جدول مکمل ۵).

تکنیک‌های تهیه و تعیین مناطق و پهنه‌های خطر، آسیب‌پذیری و ریسک سیل

نسبت سازگاری کلی برای نقشه مناطق با خطر سیل (FHZ) و مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل (FVZ) برای منطقه مورد مطالعه، همان‌طور که در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است، قابل قبول و معتبر در نظر گرفته شد، بر اساس تصمیمات کارشناسان برای هر عامل انتخاب شده در مدل AHP تمام تصاویر طبقه‌بندی شده پارامترهای انتخاب شده با اندازه سلول شبکه 30×30 متر در نظر گرفته شدند (Chakraborty and Mukhopadhyay, 2019; Ghosh et al., 2021). پس از محاسبه وزن‌ها و رتبه‌بندی برای پارامترها و زیرپارامترهای انتخاب شده، مناطق با خطر سیل، مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل و مناطق با ریسک سیل در محیط GIS 10.8 با اجرای محاسبه‌گر رستری^{۳۳} با روابط زیر به ترتیب ایجاد شدند (روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹).

³³ raster calculator

³¹ Consistency Ratio

³² Random Consistency Index

$$FHZ = \sum_{i=1}^n W_i^H * S_i^H \quad (17)$$

که در آن FHZ به منطقه‌بندی خطر سیل اشاره دارد؛ W_i^H نشان‌دهنده وزن تجمعی پارامترهای خطر و S_i^H نشان‌دهنده وزن زیرپارامترهای خطر است.

$$FVZ = \sum_{i=1}^n W_i^V * S_i^V \quad (18)$$

که در آن FVZ به منطقه‌بندی آسیب‌پذیری سیل اشاره دارد؛ W_i^V نشان‌دهنده وزن تجمعی پارامترهای آسیب‌پذیری و S_i^V نشان‌دهنده وزن زیرپارامترهای آسیب‌پذیری است. نقشه نهایی منطقه با خطر سیل با ضرب نقشه‌های خطر سیل و آسیب‌پذیری سیل به صورت زیر تهیه می‌شود:

$$FRZ = FHZ * FVZ \quad (19)$$

روش‌های تحلیل حساسیت

از آنجایی که تخصیص وزن‌ها به معیارها در مدل AHP می‌تواند تا حدی تحت تأثیر قضاوت‌های ذهنی قرار گیرد، تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی پایداری نتایج مدل در برابر تغییرات احتمالی در وزن‌های ورودی و نیز درک نقش هر شاخص در خروجی نهایی، ضروری است. در این پژوهش، از دو رویکرد اصلی تحلیل حساسیت، یعنی تحلیل حساسیت تک پارامتری^{۳۴} (SPS) و تحلیل حساسیت حذف نقشه^{۳۵} (MRS)، برای اعتبارسنجی و بهبود مدل خطر و آسیب‌پذیری سیل استفاده شده است (Mukherjee and Singh, 2020).

رویکرد تحلیل حساسیت تک پارامتری

برای هر یک از شاخص‌های تعیین‌کننده خطر و آسیب‌پذیری سیل، وزن اختصاص‌داده‌شده (وزن تجربی) به‌صورت سیستماتیک و با درصدهای مشخصی افزایش و کاهش داده شد. در هر مرحله از تغییر وزن یک شاخص، وزن‌های سایر شاخص‌ها به تناسب مجدداً نرمال‌سازی شدند تا مجموع کل وزن‌ها همچنان ۱۰۰ درصد باقی بماند. پس از هر تغییر، فرایند AHP مجدداً اجرا شده و نقشه‌های FHZ و FVZ بازسازی شدند. سپس، وزن مؤثر^{۳۶} (EW) هر شاخص با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$EW = \frac{P_r P_w}{FHZ} \times 100 \quad (20)$$

$$EW = \frac{P_r P_w}{FVZ} \times 100 \quad (21)$$

که در آن EW وزن مؤثر است؛ P_r و P_w به ترتیب نرخ و وزن پارامترها هستند؛ و FHZ و FVZ نقشه‌های منطقه‌بندی خروجی مربوطه را نشان می‌دهند. مقدار "کاهش" یا "افزایش" بین وزن تجربی و وزن مؤثر، نشان‌دهنده میزان حساسیت مدل به تغییرات وزن آن شاخص خاص بود. هر چه این تفاوت بیشتر باشد، نشان‌دهنده حساسیت بالاتر مدل به آن شاخص است (Mukherjee and Singh, 2020).

تحلیل حساسیت حذف نقشه

این روش حذف یک پارامتر موضوعی واحد و اجرای مجدد روش‌های AHP را برای بازسازی FHZ و FVZ، بدون در نظر گرفتن آن پارامترهای خاص، تسهیل می‌کند. در این رویکرد، هر یک از شاخص‌های ورودی مدل (مانند شیب، فاصله از رودخانه، پوشش اراضی و غیره) به‌صورت مجزا و تکی از مجموعه داده‌ها حذف شدند. پس از حذف هر شاخص، مدل MCDM-AHP مجدداً با استفاده از شاخص‌های باقی‌مانده اجرا شده و نقشه‌های جدید FHZ و FVZ (با حذف آن شاخص خاص) تولید شدند. سپس، میزان تغییر در پهنه‌بندی مناطق خطر و آسیب‌پذیری سیل نسبت به نقشه‌های اولیه (که شامل تمامی شاخص‌ها بودند) با استفاده از شاخص حساسیت^{۳۷} (SI) محاسبه گردید:

شاخص تحلیل حساسیت حذف نقشه برای FHZ و FVZ با استفاده از روابط زیر (روابط ۲۲ و ۲۳) محاسبه شد.

³⁶ Effective Weight

³⁷ Sensitivity Index

³⁴ Single parameter sensitivity

³⁵ Map removal sensitivity

$$SI = \frac{\left| \left(\frac{FHZ}{N} \right) - \left(\frac{FHZ}{n} \right) \right|}{FHZ} \times 100 \quad (22)$$

$$SI = \frac{\left| \left(\frac{FVZ}{N} \right) - \left(\frac{FVZ}{n} \right) \right|}{FVZ} \times 100 \quad (23)$$

که در آن FHZ و FVZ نشان‌دهنده منطقه خطر سیل و منطقه آسیب‌پذیری سیل قبلی است؛ FHZ و FVZ منطقه خطر سیل و منطقه آسیب‌پذیری سیل جدید را که با حذف یک‌لایه واحد

ایجاد شده‌اند، نشان می‌دهند؛ شاخص حساسیت نشان‌دهنده درصد تغییرات در هر یک از کلاس‌های خطر و آسیب‌پذیری (از بسیار کم تا بسیار زیاد) پس از حذف یک‌لایه بود. تغییرات کوچک در SI به معنای پایداری بالای مدل و نقش جزئی آن لایه خاص در تعیین خروجی نهایی است، درحالی‌که تغییرات بزرگ نشان‌دهنده تأثیرگذاری قابل توجه آن لایه بر نتایج مدل می‌باشد. این تحلیل به ما اطمینان داد که حتی با حذف برخی از لایه‌ها، ساختار کلی پهنه‌بندی خطر و آسیب‌پذیری سیل پایدار می‌ماند که نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت اطمینان بالای مدل پیشنهادی است.

رویکردهای اعتبارسنجی

از روش‌های متداول ROC-AUC، RMSE و MSE برای اعتبارسنجی نقشه FHZ منطقه استفاده شده است. نمودار ROC-AUC برای FHZ منطقه با استفاده از نقاط سیلابی و غیر سیلابی و با استفاده از روابط زیر ۲۴ و ۲۵ و به دنبال آن (Swets, 1988) اعتبارسنجی شد.

$$x = 1 - \text{Specificity} = 1 - \left[\frac{TN}{(TN + FP)} \right] \quad (24)$$

$$y = \text{Sensitivity} = \left[\frac{TN}{(TP + FN)} \right] \quad (25)$$

در این معادلات، TN نشان‌دهنده موارد منفی صحیح، FP نشان‌دهنده موارد مثبت کاذب، TP نشان‌دهنده موارد مثبت صحیح و FN نشان‌دهنده موارد منفی کاذب است. علاوه بر این، برای درک بهتر دقت پیش‌بینی و برازش مدل FHZ، از روابط RMSE و MSE نیز استفاده شده است (روابط ۲۶ و ۲۷).

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n} \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (27)$$

در این معادلات، n تعداد کل نقاط داده، x_i مقدار مشاهده شده و y_i مقدار پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

ارزیابی همبستگی خطی چندگانه

ارزیابی چندخطی بودن از نقاط نمونه‌گیری تصادفی برای تشخیص درجه چندخطی بودن بین خطرات سیل و عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری سیل استفاده شد. در مجموع از کل نقاط نمونه برای ارزیابی از روش‌های تحمل و ضریب تورم واریانس (VIF) که هر دو عامل مؤثر هستند استفاده شد. آمار استنباط شده نشان داد که ۵ عامل خطر سیل دارای مسائل چندخطی هستند، از جمله تجمع جریان، شاخص توان جریان، لیتولوژی، ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی (جدول ۴). با نگاهی به عوامل آسیب‌پذیری سیل، دو پارامتر در مسئله چندخطی بودن: توزیع جمعیت و جمعیت زیر ۶ ساله باقی می‌ماند (همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است مقادیر VIF و تحمل این پارامترها به ترتیب بزرگ‌تر از ۹ و کمتر از ۰/۱ است) که برای مدل AHP در نظر گرفته نشدند.

جدول ۲. ماتریس تصمیم‌گیری زوجی عوامل مؤثر بر خطر سیل

Table 2. Pairwise comparison matrix of the factors affecting flood hazard

پارامترها	ارتفاع Elevation	شیب Slope	تراکم زهکشی Drainage density	فاصله از رودخانه Distance from river	رطوبت توپوگرافی Topographic wetness	کاربری زمین Land use	بارندگی Rainfall	انحنای Curvature	تراکم خطواره Lineament density	جهت شیب Aspect	CR
ارتفاع Elevation	1	2	3	3	3	3	4	7	7	8	0.69
شیب Slope	1.2	1	2	3	3	3	4	7	7	8	
تراکم زهکشی Drainage Density	1.3	1.2	1	2	3	3	4	7	7	8	
فاصله از رودخانه Distance from the River	1.3	1.3	1.2	1	2	2	3	6	6	7	
رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness	1.3	1.3	1.3	1.2	1	2	3	6	6	7	
کاربری زمین Land Use	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1	3	5	6	7	
بارندگی Rainfall	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1	5	5	6	
انحنای Curvature	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1	3	4	
تراکم خطواره Lineament Density	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.3	1	2	
جهت شیب Aspect	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.6	1.4	1.2	1	
مجموع Total	3.49	5.16	7.83	10.81	13.31	14.84	22.57	44.58	48.50	58	

جدول ۳. ماتریس تصمیم‌گیری زوجی عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری در برابر سیل

Table 3. Pairwise comparison matrix of the factors affecting flood vulnerability

پارامترها	تراکم جمعیت Population density	تراکم سکونتگاه Settlement density	فاصله از شبکه راه‌ها Distance from road network	فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی Distance from health and medical centers	تراکم راه Road density	CR	مجموع Total
تراکم جمعیت Population Density	1	2	5	5	7	0.052	2.186
تراکم سکونتگاه Settlement Density	1.2	1	3	5	7		3.876
فاصله از شبکه راه‌ها Distance from Road Network	1.5	1.3	1	3	6		9.833
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی Distance from Health and Medical Centers	1.5	1.5	1.3	1	3	0.052	14.833
تراکم راه Road Density	1.7	1.7	1.6	1.3	1		27

جدول ۴. آماره‌های چندخطی (میزان تحمل و عامل تورم واریانس) شاخص‌های مؤثر بر خطر سیل

Table 4. Multicollinearity statistics (tolerance and variance inflation factor) of the indices affecting flood hazard

پارامترها Parameters	ارتفاع Elevation	شیب Slope	تراکم زهکشی Drainage density	فاصله از رودخانه Distance from river	تجمع جریان Flow accumulation	توان جریان Stream power	رطوبت توپوگرافی Topographic wetness	کاربری زمین Land use	بارندگی Rainfall	لیتولوژی Lithology	ژئومورفولوژی Geomorphology	زمین‌شناسی Geology	انحنای Curvature	تراکم راه Road density	جهت شیب Aspect
Tolerance	0.37	0.17	0.83	0.82	0	0	0.16	0.44	0.87	0	0	0	0.9	0.87	0.81
VIF	2.74	5.82	1.21	1.22	92.1	70.07	6.11	2.29	1.15	99.12	43.76	52.05	1.11	1.14	1.23

جدول ۵. آماره‌های چندخطی (میزان تحمل و عامل تورم واریانس) شاخص‌های مؤثر بر آسیب پذیری سیل

Table 5. Multicollinearity statistics (tolerance and variance inflation factor) of factors affecting flood vulnerability

پارامترها Parameters	توزیع جمعیت Population distribution	گروه‌های جمعیتی ۶-۱۰ ساله Population groups	تراکم جمعیت Population density	فاصله از شبکه جاده‌ای Distance from Road	تراکم سکونتگاه Settlement density	فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی Distance from health center	تراکم جاده Road density
Tolerance	0.00	0.00	0.44	0.45	0.50	0.75	0.50
VIF	97.05	103.64	2.28	2.22	2.01	1.33	1.99

اهمیت و گستره فضایی شاخص‌های خطر سیل و آسیب‌پذیری

عوامل خطر سیل و آسیب‌پذیری دارای الگوی فضایی قابل توجهی هستند و تأثیر زیادی بر تنوع ریسک سیل دارند. این شاخص‌ها به دسته‌های بسیار کم تا بسیار زیاد طبقه‌بندی شده و برای سهولت تجزیه و تحلیل به اعداد ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شوند. در این مطالعه، همه پارامترهای در نظر گرفته شده نقش مهمی در ایجاد نقشه مناطق با خطر سیل (FHZ) منطقه با وزن‌های مختلف بر اساس تصمیمات تعیین شده داشته‌اند. ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، بارندگی، انحنای توپوگرافی و جهت شیب بیشترین وسعت را در مناطق با سطح خطر سیل بسیار بالا در منطقه به خود اختصاص داده‌اند. برعکس، تراکم زهکشی، شاخص توپوگرافی، کاربری اراضی و تراکم خطواره به طور نسبی مساحت کمتری را در زیر منطقه با خطر سیل بسیار بالا تشکیل می‌دهند. توضیح دقیق در مورد گستره فضایی پارامترهای خطر سیل در جدول ۶ ارائه شده است. تنوع مکانی مناطق مختلف سطح سیل عوامل غالب و ماتریس زوج به زوج زیرمجموعه‌های آن‌ها، رتبه‌بندی و ضریب سازگاری (CR) مربوطه در (جدول ۶) شرح داده شده است. در این مطالعه، تراکم جمعیت آسیب‌پذیری در برابر سیل را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، به تراکم جمعیت بالا وزن بیشتری نسبت داده شده است و بالعکس. ارزیابی دقیق‌تر مکانی شاخص‌های آسیب‌پذیری سیل در جدول ۷ شرح داده شده است. همه عوامل در نظر گرفته شده و زیر ویژگی‌های آنها سطوح خاصی از مناطق آسیب‌پذیری را در داخل منطقه اشغال کرده‌اند. الگوی فضایی چنین عواملی به همراه زیرمجموعه‌های آنها، با برجسته کردن نرخ‌های استاندارد شده CR در (جدول ۷) شرح داده شده است.

جدول ۶. پارامترهای انتخاب شده خطر سیل در منطقه مورد مطالعه

Table 6. Selected flood hazard parameters in the studied area

شاخص Indices	وزن / Weights	طبقه Class	میزان خطر Hazard level	ارزش هر کلاس Class value	رتبه‌بندی Ranking	CR
ارتفاع (متر) Elevation(m)	0.238	13 - 18	بسیار زیاد Very High	5	0.459	0.03
		18-25	زیاد High	4	0.289	
		25-32	متوسط Moderate	3	0.148	

شیب (درجه) Slope (Degree)	0.191	32-41	کم Low	2	0.063	0.042
		41-94	بسیار کم Very Low	1	0.041	
		0-1.3	بسیار زیاد Very High	5	0.465	
		1.3-2.7	زیاد High	4	0.285	
		2.7-4.6	متوسط Moderate	3	0.143	
		4.6-8.2	کم Low	2	0.063	
		8.2-31	بسیار کم Very Low	1	0.43	
تراکم رهکشی (کیلومتر مربع) Drainage Density (km ²)	0.155	4.9-6.1	بسیار زیاد Very High	5	0.458	0.033
		3.7-4.9	زیاد High	4	0.296	
		2.4-3.7	متوسط Moderate	3	0.134	
		1.2-2.4	کم Low	2	0.075	
		0-1.2	بسیار کم Very Low	1	0.037	
		0-1700	بسیار زیاد Very High	5	0.511	
		1700-3400	زیاد High	4	0.265	
فاصله از رودخانه (متر) Distance from River(m)	0.111	3400-5100	متوسط Moderate	3	0.113	0.027
		5100-6700	کم Low	2	0.067	
		6700-8400	بسیار کم Very Low	1	0.044	
		-7.7 - -4.1	بسیار زیاد Very High	5	0.51	
		-4.1 - -2.6	زیاد High	4	0.24	
		-2.6 - -0.69	متوسط Moderate	3	0.15	
		-0.69 -2.1	کم Low	2	0.06	
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness Index (TWI)	0.097	2.1 - 11	بسیار کم Very Low	1	0.04	0.037
		پهنه آبی	بسیار زیاد Very High	5	0.435	
		زمین بایر	زیاد High	4	0.283	
		کشاورزی	متوسط Moderate	3	0.177	
		ساخته شده	کم Low	2	0.066	
		پوشش گیاهی	بسیار کم Very Low	1	0.039	
		205-218	بسیار زیاد Very High	5	0.477	
کاربری زمین Land use / Land cover (LULC)	0.084	218-231	زیاد High	4	0.269	0.015
		231-244	متوسط Moderate	3	0.129	
بارندگی (میلی متر) Rainfall / Precipitation (m m)	0.059					

انحنای توپوگرافی Topographic curvature	0.029	244-256	کم/ Low	2	0.077	0.081
		256-269	بسیار کم Very Low	1	0.048	
		-0.3 - 0.5	بسیار زیاد Very High	5	0.71	
		0.5 - 30.26	متوسط Moderate	3	0.2	
		-0.3 - 31.85	بسیار کم Very Low	1	0.02	
تراکم خطواره (کیلومتر مربع) Lineament density (km ²)	0.02	0.86-1.1	بسیار زیاد Very High	5	0.491	0.059
		0.64-0.86	زیاد/ High	4	0.269	
		0.43-0.64	متوسط Moderate	3	0.144	
		0.21-0.43	کم/ Low	2	0.057	
		0-0.21	بسیار کم Very Low	1	0.038	
جهت شیب/ Aspect	0.015	0-68	بسیار زیاد Very High	5	0.516	0.024
		68-142	زیاد/ High	4	0.255	
		142-213	متوسط/ Moderate	3	0.114	
		213-283	کم/ Low	2	0.07	
		283-359	بسیار کم Very Low	1	0.045	

جدول ۷. پارامترهای انتخاب شده آسیب سیل در منطقه مورد مطالعه

Table 7. Selected flood vulnerability parameters in the studied area

شاخص Indices	وزن/ Weights	طبقه/ Class	میزان خطر/ Hazard level	رتبه بندی Ranking	CR
تراکم جمعیت (کیلومتر مربع) Population Density (km ²)	0.410	بالتر از ۴۴۰	بسیار زیاد Very High	5	0.460
		44-440	زیاد/ High	4	0.283
		31-44	متوسط/ Moderate	3	0.153
		22-31	کم/ Low	2	0.059
		0-22	بسیار کم Very Low	1	0.045
تراکم سکونتگاه (کیلومتر مربع) Settlement density (km ²)	0.277	0.20-0.24	بسیار زیاد Very High	5	0.427
		0.15-0.20	زیاد/ High	4	0.275
		0.09-0.15	متوسط/ Moderate	3	0.179
		0.04-0.09	کم/ Low	2	0.075
		0-0.04	بسیار کم Very Low	1	0.045
فاصله از شبکه راهها (متر) Distance from road network	0.145	7200-9000	بسیار زیاد Very High	5	0.501
		5400-7200	زیاد/ High	4	0.267

فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی (کیلومتر)
Distance from health and medical centers (km)

تراکم راه (کیلومتر مربع)
Road density (km²)

0.077

0.033

3600-5400

1800-3600

0-1800

23.1-28.9

17.3-23.1

11.5-17.3

5.7-11.5

0-5.7

0-0.16

0.16-0.32

0.32-0.48

0.48-0.64

0.64-0.8

Moderate/متوسط

Low/کم

بسیار کم

Very Low

بسیار زیاد

Very High

High/زیاد

Moderate/متوسط

Low/کم

بسیار کم

Very Low

بسیار زیاد

Very High

High/زیاد

متوسط

Moderate

کم

Low

بسیار کم

Very Low

3

2

1

5

4

3

2

1

5

4

3

2

1

0.130

0.062

0.040

0.472

0.292

0.132

0.063

0.041

0.433

0.255

0.174

0.091

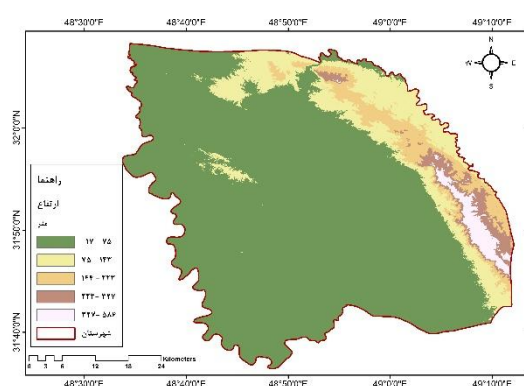
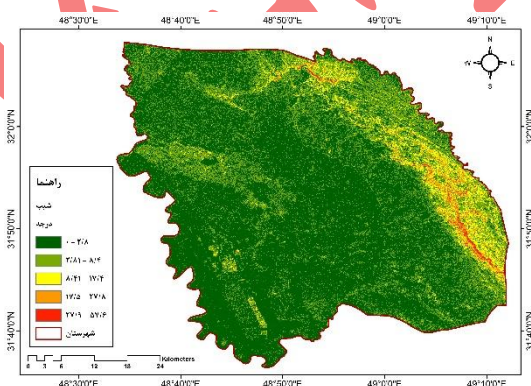
0.046

0.028

0.016

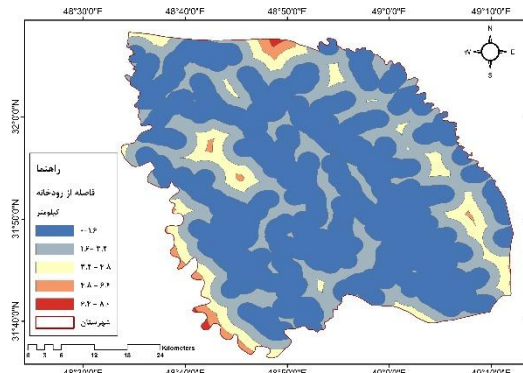
الگوهای جغرافیایی FRZ و FVZ، FHZ

مدل خروجی، الگوی فضایی متنوعی از نقشه‌های: منطقه با خطر سیل (FHZ)، منطقه آسیب پذیر در برابر سیل (FVZ) و منطقه با ریسک سیل (FRZ) را نشان می‌دهد که با عنوان بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شده است (شکل ۶- الف، ب و پ). با توجه به نقشه منطقه با خطر سیل (FHZ)، مناطق مستعد سیل با شدت بالا و بسیار بالا در نزدیکی مسیرهای رودخانه‌ای و مناطق مجاور آن‌ها یافت می‌شوند. آخرین مرحله این مطالعه ترکیب FHZ و FVZ برای ارزیابی FRZ منطقه است. که نشان می‌دهد که ۱۰/۹۶٪ و ۲۲/۳۱٪ از کل مساحت منطقه در مناطق با خطر سیل بسیار بالا و بسیار پایین قرار دارند. شرح جامعی در مورد تغییرات مکانی FHZ، FVZ و FRZ منطقه در جدول ۸ نشان داده شده است.



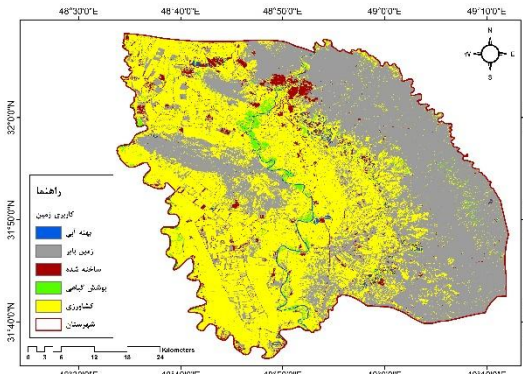
(ب)

(b)



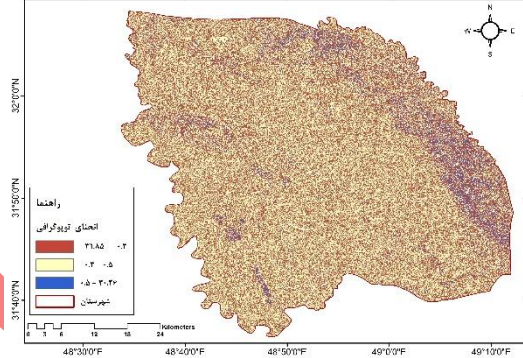
(ت)

(d)



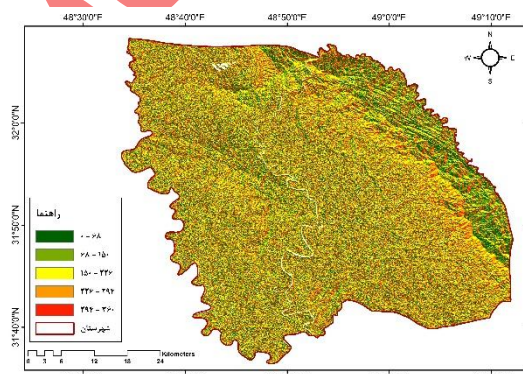
(ج)

(f)



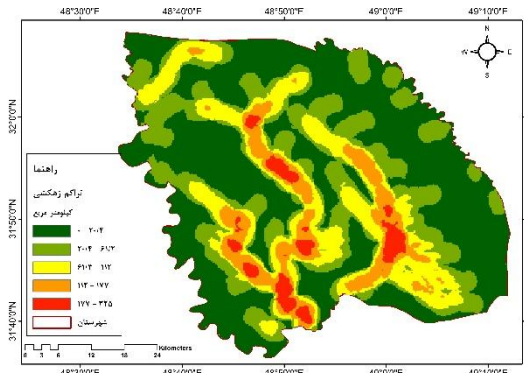
(ح)

(h)



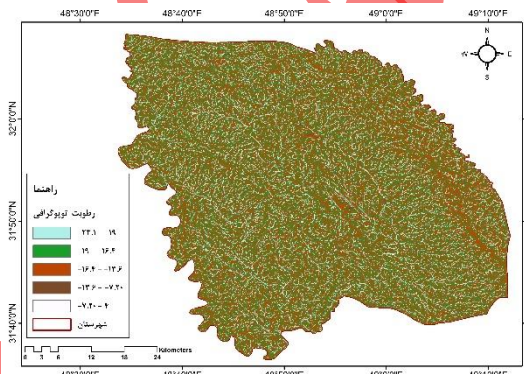
(الف)

(a)



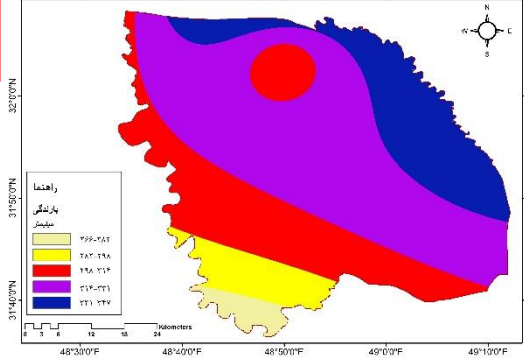
(پ)

(c)



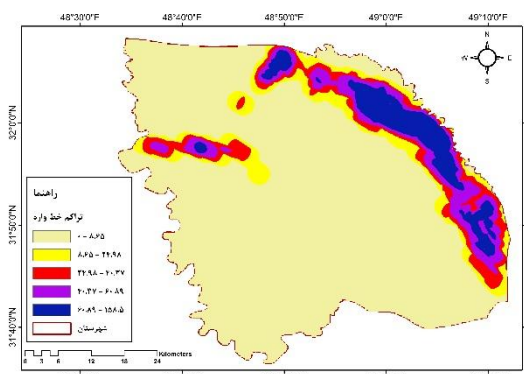
(ث)

(e)



(ج)

(g)



(د)

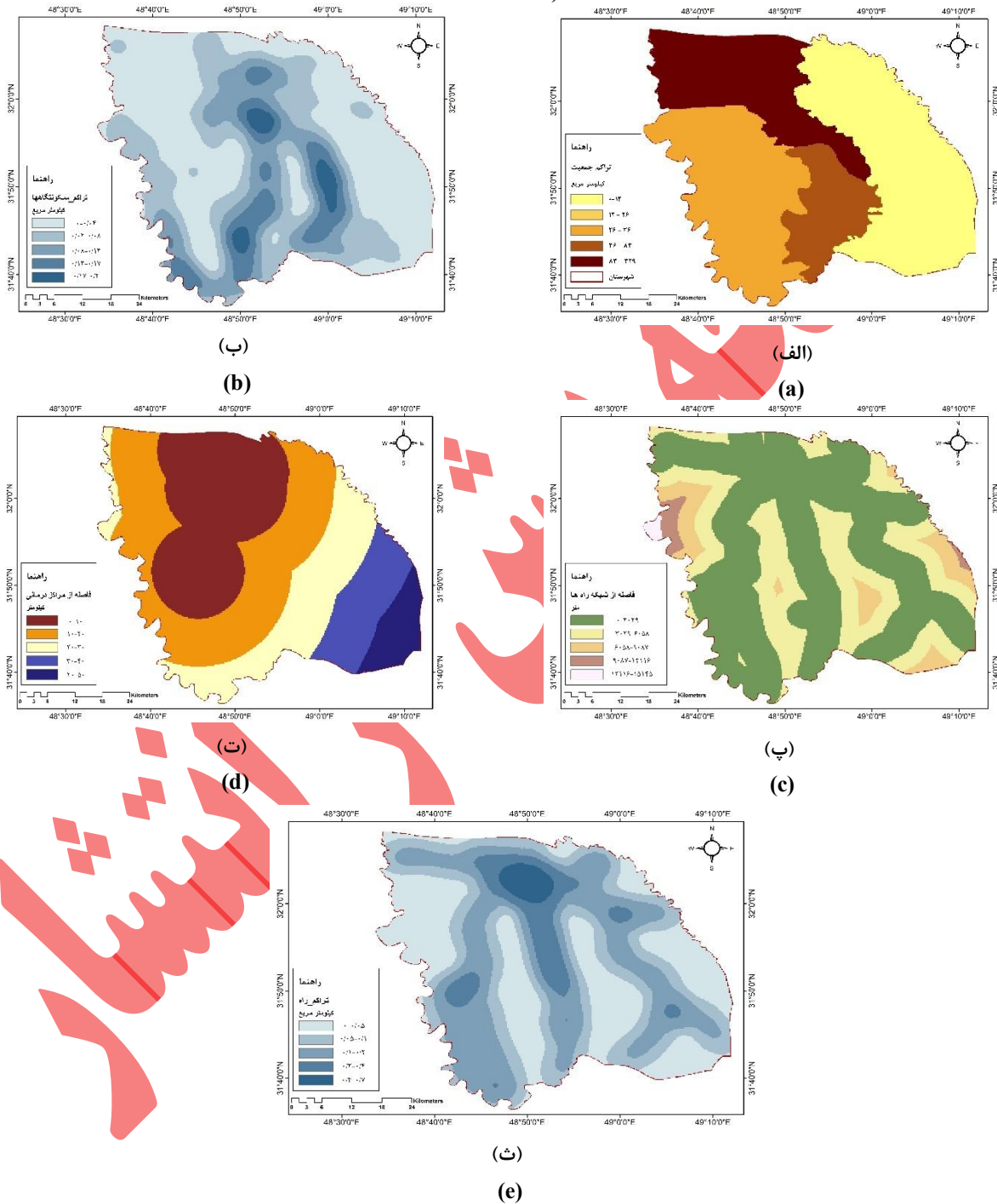
(خ)

(j)

(i)

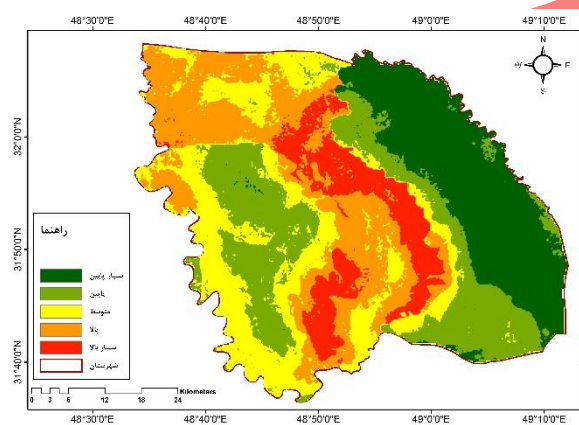
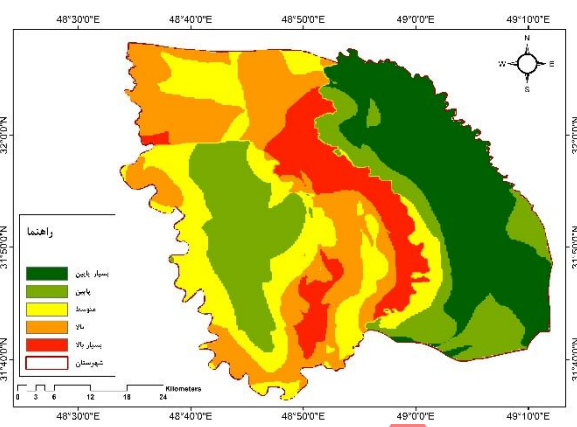
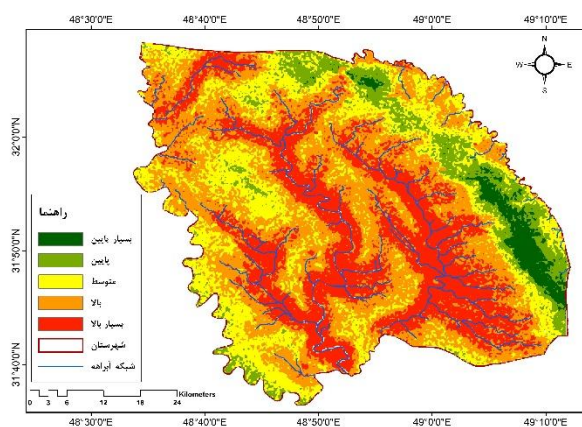
شکل ۴. عوامل مؤثر بر خطر سیل: (الف) ارتفاع؛ (ب) شیب؛ (پ) تراکم آبراهه‌ها / زهکشی؛ (ت) فاصله از رودخانه؛ (ث) رطوبت توپوگرافی؛ (ج) کاربری اراضی؛ (چ) بارش؛ (ح) تحدب/تقعر (انحنای زمین)؛ (خ) تراکم گسل/چین خوردگی (تراکم خطواره)؛ (د) جهت شیب.

Fig 4. Factors influencing flood hazard: (a) Elevation; (b) Slope; (c) Drainage density; (d) Distance from river; (e) Topographic wetness index (TWI); (f) Land use/Land cover (LULC); (g) Rainfall (Precipitation); (h) Topographic curvature (concavity/convexity); (i) Lineament density (fault/fold density); (j) Aspect (slope direction).



شکل ۵- عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری سیل: (الف) تراکم جمعیت؛ (ب) تراکم سکونتگاه؛ (پ) فاصله از شبکه راهها؛ (ت) فاصله از مراکز بهداشتی- درمانی؛ (ث) تراکم راه.

Fig 5. Factors affecting flood vulnerability: (a) Population density; (b) Settlement density; (c) Distance from road network; (d) Distance from health and medical centers; (e) Road density.



(پ)

(c)

شکل ۶. (الف) منطقه با خطر سیل؛ (ب) منطقه آسیب‌پذیر در برابر سیل؛ (پ) منطقه با ریسک سیل

Fig 6. (a) Flood hazard zone; (b) Flood vulnerability zone; (c) Flood risk zone

جدول ۸. توزیع فضایی مناطق با خطر سیل، آسیب‌پذیری سیل و ریسک سیل در منطقه

Table 8. Spatial distribution of flood hazard, flood vulnerability, and flood risk zones in the region

سطح Class	منطقه با خطر سیل FHZ مساحت Area		منطقه آسیب‌پذیر در برابر سیل FVZ مساحت Area		منطقه با ریسک سیل FRZ مساحت Area	
	(هکتار)		(هکتار)		(هکتار)	
	(درصد)		(درصد)		(درصد)	
	Hectares	Percentage	Hectares	Percentage	Hectares	Percentage
بسیار پایین / Very Low	7995	9.8	12710	15.5	22836	27.9
پایین / Low	17465	21.3	18356	22.4	25253	30.8
متوسط / Moderate	17421	21.3	25274	30.8	13280	16.2
بالا / High	23059	28.1	17047	20.8	16095	19.6
بسیار بالا / Very High	16037	19.6	8588	10.5	4510	5.5

بهبود عملکرد روش AHP با تحلیل حساسیت

در ادامه پژوهش، تحلیل حساسیت بر روی نقشه‌های FHZ و مناطق FVZ انجام شد. هدف از این تحلیل، بررسی و درک چگونگی تأثیر وزن و رتبه لایه‌های موضوعی بر خروجی نهایی نقشه‌ها است.

ارزیابی تحلیل حساسیت تک پارامتری (SPS) برای FVZ و FHZ

خروجی آماری نشان می‌دهد که وزن مؤثر میانگین برای شیب، فاصله از رودخانه و انحنای توپوگرافی بیشتر از وزن‌های تجربی اختصاص داده شده است. کمترین وزن مؤثر میانگین برای تراکم خطواره (۰/۹۶٪) یافت شد. کمترین تغییر بین وزن تجربی و وزن مؤثر میانگین برای کاربری زمین و بارندگی و جهت شیب محاسبه شد. در میان عوامل آسیب‌پذیری سیل، بیشترین وزن به تراکم جمعیت (۰/۴۳٪) اختصاص داده شد، اما کاهش ارزش بین وزن تجربی و وزن مؤثر میانگین (۰/۳۷/۲۹٪) را نشان می‌دهد. به طور مشابه، تراکم سکونتگاه نیز با وزن مؤثر میانگین (۰/۲۵/۶۶٪) کاهش یافت. فاصله از شبکه راه ها (۰/۱۷/۴۵٪)، فاصله تا مراکز بهداشتی و درمانی (۰/۱۱/۳۲٪) و تراکم راه (۰/۸/۲۸٪) به ترتیب وزن مؤثر میانگین بیشتری نسبت به وزن تجربی اختصاص داده شده به دست آوردند (جدول ۱۰). اگرچه تراکم جمعیت و تراکم سکونتگاه همچنان به ترتیب بالاترین وزن مؤثر میانگین را دارند.

جدول ۹. توصیف آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری برای شاخص‌های مناطق با خطر سیل

Table 9. Statistical description of single-parameter sensitivity analysis for flood hazard zone indices

شاخص‌ها Indices	وزن تجربی (درصد) Empirical Weight(%)	وزن‌های مؤثر شاخص (درصد) Effective Index Weights (%)			
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف معیار Standard Deviation
Elevation ارتفاع	24	8.62	54.74	31.96	3.69
Slope شیب	19	5.65	44.77	22.92	3.53
Drainage density تراکم زهکشی	15	3.58	29.75	8.59	4.22
Distance from river فاصله از رودخانه	11	3.08	29.29	12.21	2.78
Topographic wetness Index (TWI) رطوبت توپوگرافی	10	2.21	21.23	6.91	2.30
Land Use / Land Cover (LULC) کاربری اراضی	8	1.84	23.42	6.26	2.19
Rainfall بارش	6	1.35	21.92	5.54	2.36
Topographic curvature انحنای توپوگرافی	3	0.60	11.28	3.36	1.29
Lineament density تراکم خطواره	2	0.41	6.87	0.96	0.67
Aspect جهت شیب	2	0.31	82.5	1.28	0.63

جدول ۱۰. توصیف آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری برای شاخص‌های مناطق با آسیب‌پذیری سیل

Table 10. Statistical description of single-parameter sensitivity analysis for flood vulnerability zone indices

شاخص‌ها Indices	وزن تجربی (درصد) Empirical Weight(%)	وزن‌های مؤثر شاخص (درصد) Effective Index Weights (%)			
		حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف معیار Standard Deviation
Population density تراکم جمعیت	43	18.21	70.66	37.29	9.46
Settlement density تراکم سکونتگاه	29	7.12	65.70	25.66	10.21
distance from road network فاصله از شبکه راه‌ها	15	4.26	39.66	17.45	8.24
Distance from health and treatment centers فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی	9	2.26	25.02	11.32	5.29

ارزیابی حساسیت حذف نقشه^{۳۸} (MRS) برای FHZ و FVZ

با حذف هر لایه، نتیجه نشان‌دهنده‌ی تغییرات ناچیز در میانگین شاخص حساسیت بود که این موضوع نشان‌دهنده‌ی حساسیت کمتر در تعیین عوامل خطر سیل و عوامل منطقه‌بندی آسیب‌پذیری سیل است. تفاوت کلی بین بالاترین و پایین‌ترین شاخص حساسیت تقریباً ۱٪ برای شاخص‌های مناطق با خطر سیل است. حداکثر مقدار تغییر شاخص حساسیت (میانگین $SI=1/0.32$ درصد) با حذف لایه ارتفاع مشاهده شد، درحالی‌که حداقل مقدار تغییر (میانگین $SI=2/645$ درصد) پس از حذف تراکم جمعیت مشاهده شد، درحالی‌که کمترین تغییر (میانگین $SI=0/822$ درصد) پس از حذف فاصله تا مراکز بهداشتی و درمانی در بین ۵ عامل منطقه‌بندی آسیب‌پذیری سیل رخ داد (جدول ۱۲). نتایج نشان می‌دهد که با حذف هر لایه از هر دو شاخص FHZ و FVZ، تغییر قابل توجهی در مساحت بالقوه ایجاد می‌شود. بیشترین نرخ افزایش در مناطق با خطر سیل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد با حذف لایه‌های موضوعی ارتفاع ($+1/15/12$ ، شیب ($+67/86$ ٪)، انحنای توپوگرافی ($+2/13$ ٪)، تراکم زهکشی ($+38/30$ ٪) و جهت شیب ($+29/88$ ٪) به ترتیب قابل مشاهده است. برعکس، بیشترین نرخ کاهش در مناطق با خطر سیل بسیار کم، کم و متوسط با حذف تراکم زهکشی مشاهده می‌شود که به ترتیب ($-31/88$ ٪، $-61/44$ ٪ و $-15/59$ ٪) را شامل می‌شود، درحالی‌که با حذف شاخص ارتفاع، کاهش ($-14/86$ ٪ و $-27/43$ ٪) در مناطق با خطر سیل زیاد و بسیار زیاد مشاهده شده است (جدول ۱۳). در این پژوهش، با حذف تک‌تک لایه‌های موضوعی، اقدام به تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل (FHZ) منطقه گردید. تغییرات قابل توجهی در درصد مساحت مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل با حذف هر لایه و انجام آمار حساسیت حذف نقشه مشاهده شد، همان‌طور که در جدول ۱۴ نشان داده شده به طور مشابه، بیشترین نرخ افزایش در مناطق با آسیب‌پذیری بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار بالا برای FVZ با حذف تراکم جاده‌ای ($+33/64$ ٪)، فاصله تا مراکز بهداشتی و درمانی ($+6/12$ ٪)، تراکم جمعیت ($+24/29$ ٪، $+5/42$ ٪ و $+39/16$ ٪) مشاهده شد. برعکس، بیشترین درصد کاهش مساحت مناطق با آسیب‌پذیری بالا پس از حذف تراکم جمعیت ($-37/91$ ٪)، تراکم راه‌ها ($-12/17$ ٪)، تراکم سکونتگاه ($-10/06$ ٪)، فاصله تا مراکز بهداشتی و درمانی ($-36/59$ ٪ و $-48/92$ ٪) به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار بالا مشاهده شد.

جدول ۱۱. توصیف آماری تحلیل حساسیت حذف نقشه برای شاخص‌های FHZ

Table 11. Statistical description of map removal sensitivity analysis for FHZ indices

شاخص‌های حذف‌شده Removed/Excluded Indices (Factors)	تغییرات شاخص حساسیت (درصد) Changes in Sensitivity Index (%)			
	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation
Elevation ارتفاع	3.77	4.076	1.032	0.444
Slope شیب	0	3.140	0.623	0.355
Drainage Density تراکم زهکشی	6.32	1.683	0.789	0.409
Distance from River فاصله از رودخانه	1.1375	2.067	0.300	0.211
Topographic Wetness Index (TWI) رطوبت توپوگرافی	0	1.296	0.343	0.203
Land Use / Land Cover (LULC) کاربری اراضی	0.0003216	1.554	0.303	0.214
Rainfall بارش	0.011764374	1.696	0.214	0.171

انحنای توپوگرافی Topographic Curvature	0.000005218	0.921	0.096	0.090
تراکم خطواره Lineament Density	0	0.687	0.160	0.070
جهت شیب Aspect	0	0.553	0.120	0.066

جدول ۱۲. توصیف آماری تحلیل حساسیت حذف نقشه برای شاخص های FVZ
Table 12. Statistical Description of Map Removal Sensitivity Analysis for FVZ Indices

شاخص های حذف شده Removed/Excluded Indices (Factors)	تغییرات شاخص حساسیت (درصد) Changes in Sensitivity Index (%)			انحراف معیار Standard deviation
	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	
تراکم جمعیت Population Density	0.00157247	8.506	2.645	1.606
تراکم سکونتگاه Settlement density	0.00666678	8.763	2.234	1.377
فاصله از شبکه راهها Distance from road network	1.47	4.643	1.285	0.781
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی Distance from health and treatment centers	1.81	3.117	0.822	0.634
تراکم راهها Road density	0	2.048	1.005	0.600

جدول ۱۳. درصد تغییر مساحت مناطق با خطر سیل بالا (FHZ) پس از حذف هر لایه
Table 13. Percentage of change in the area of high flood hazard zones after removing each layer

شاخص های حذف شده Removed/Excluded indices (Factors)	مناطق با خطر سیل (درصد) Flood hazard zones (FHZ) (Percentage)				
	بسیار پایین Very Low	پایین Low	متوسط Moderate	بالا High	بسیار بالا Very High
ارتفاع / ارتفاع Elevation	+15.12	+59.72	+0.48	-14.86	-27.43
شیب / شیب Slope	-16.37	+67.86	-6.55	-9.19	-18.84
تراکم زهکشی / تراکم زهکشی Drainage Density	-31.88	-44.61	-15.59	+38.30	+20.91
فاصله از رودخانه Distance from river	-31.27	-60.77	-1.12	+28.57	+8.24
رطوبت توپوگرافی Topographic wetness	0	+8.63	+0.02	-5.19	+3.14
کاربری اراضی / کاربری اراضی Land use	-7.51	+9.86	-2.58	-3.01	+8.11
بارش / بارش Rainfall	-25.43	-57.73	-2.41	+20.93	+21.50
انحنای توپوگرافی Topographic curvature	+4.26	+25.81	+2.13	-6.69	-14.60
تراکم خطواره Lineament density	+5.64	+21.27	+2.10	-6.04	-12.50
جهت شیب / جهت شیب Aspect	-21.78	-53.32	-4.32	+16.28	+29.88

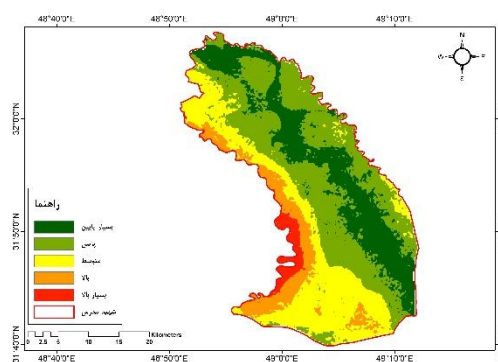
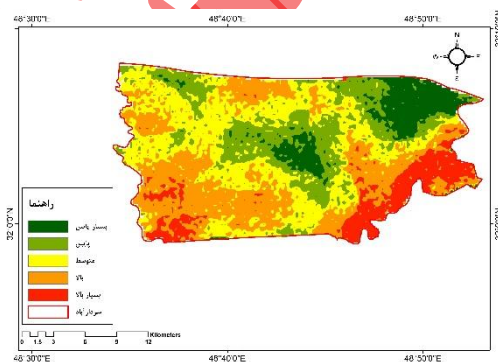
جدول ۱۴. درصد تغییر مساحت مناطق با آسیب‌پذیری (FVZ) بالا پس از حذف هر لایه

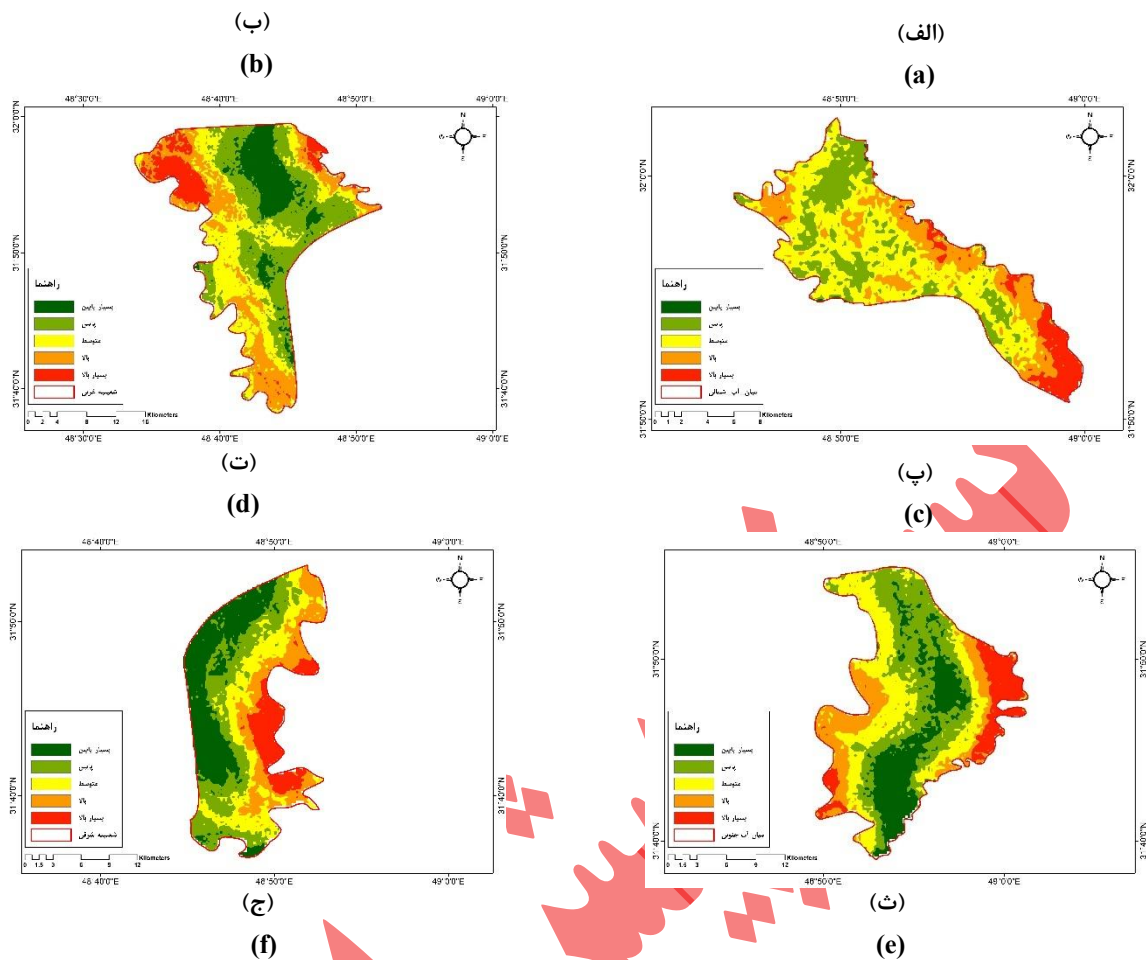
Table 14. Percentage of Change in the Area of High Flood Vulnerability Zones (FVZ) After Removing Each Layer

شاخص‌های حذف‌شده Removed/Excluded indices (Factors)	مناطق با آسیب‌پذیری در برابر سیل (درصد) Flood vulnerability zones (FVZ) (Percentage)				
	بسیار پایین Very Low	پایین Low	متوسط Moderate	بالا High	بسیار بالا Very High
تراکم جمعیت Population density	-37.91	-1.39	+24.29	+5.42	+39.16
تراکم سکونتگاه Settlement density	-5.76	+8.51	-10.06	+3.69	+7.74
فاصله از شبکه راه‌ها Distance from road network	+29.21	-1.97	-1.49	-31.22	+5.61
فاصله از مراکز بهداشتی و درمانی Distance from health and treatment centers	+32.16	+6.12	+3.86	36.59	-48.92
تراکم راه‌ها Road density	+33.64	-12.17	+4.56	-27.65	+3.26

ارزیابی ریسک سیل در سطح کوچک‌تر حوزه‌های عملکردی

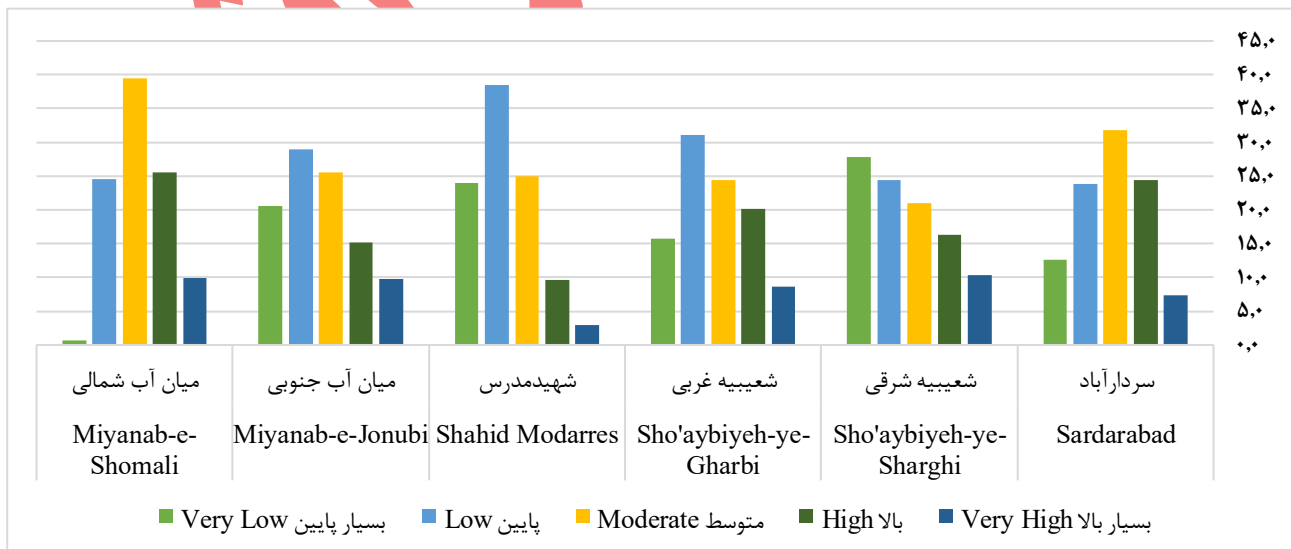
تحلیل ریسک سیل در سطح خرد اثرات جمعی مخاطرات و آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. تغییرات مکانی مناطق با خطر سیل، آسیب‌پذیری و ریسک سیل برای حوزه‌های عملکردی یکنواخت نیست (جدول ۸ تا ۱۰). با توجه نقشه نهایی مناطق با ریسک سیل (FRZ) در سطح کوچک‌تر حوزه‌های عملکردی (دهستان)، توزیع درصدی FRZ برای حوزه‌های عملکردی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. حوزه عملکردی شهید مدرس شوشتر دارای بالاترین FRZ است که مساحت کل ۸۹۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد؛ پس از آن شعبه غربی با ۴۶۵ کیلومتر مربع، سردارآباد با ۳۶۷ کیلومتر مربع، میان آب جنوبی با ۲۸۷ کیلومتر مربع، شعبه شرقی با ۲۴۸ و میان آب شمالی با ۱۴۹ کیلومتر مربع حوزه‌های عملکردی شوشتر را شکل می‌دهند. همچنین شکل ۹، موقعیت بافت تاریخی شوشتر را بر روی نقشه مناطق با ریسک سیل (FRZ) نمایش می‌دهد که ۹۶ درصد این بافت، در ناحیه با ریسک بسیار بالا طبقه‌بندی می‌شود. این موضوع، با توجه به قرارگیری آثار ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو در همین محدوده، از اهمیت بسزایی جهت برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریت بحران برای این منطقه برخوردار است.





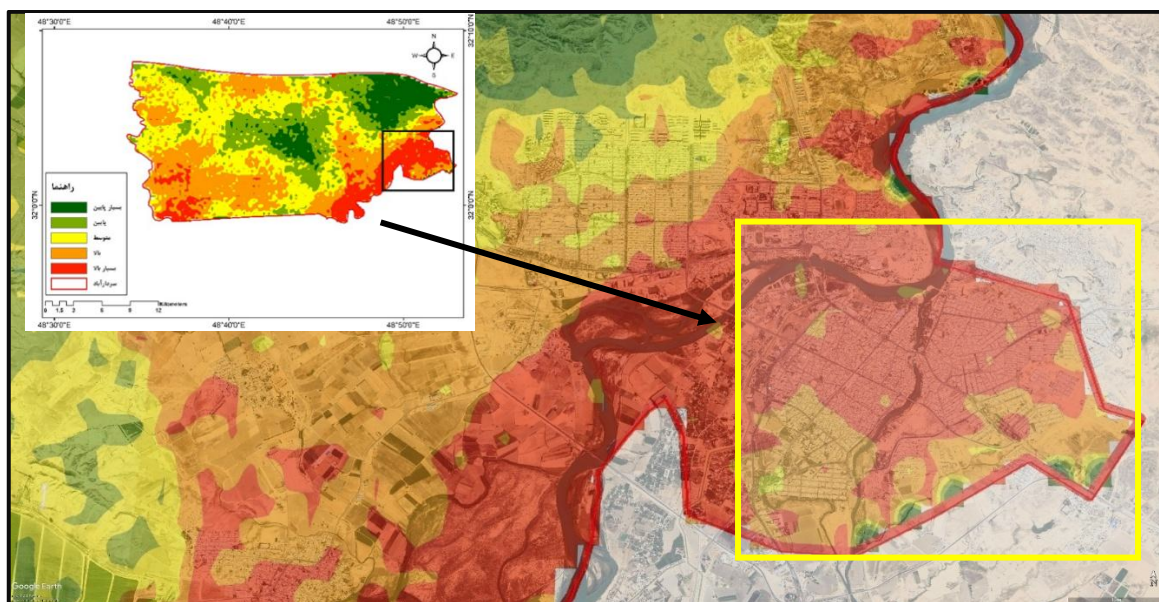
شکل ۷. مناطق با ریسک سیل (FRZ) در سطح کوچکتر حوزه‌های عملکردی (دهستان)، (الف) شهید مدرس؛ (ب) سردارآباد؛ (پ) میان آب شمالی؛ (ت) شعبیه غربی؛ (ث) میان آب جنوبی؛ (ج) شعبیه شرقی.

Fig 7. Flood risk zones (FRZ) at the smaller level of functional areas (rural districts/dehestan): (a) Shahid Modarres; (b) Sardarabad; (c) Miyanab-e-Shomali (North Miyanab); (d) Sho'aybiyeh-ye-Gharbi (West Sho'aybiyeh); (e) Miyanab-e-Jonubi (South Miyanab); (f) Sho'aybiyeh-ye-Sharghi (East Sho'aybiyeh).



شکل ۸. درصد مناطق با ریسک سیل (FRZ) در حوزه‌های عملکردی مختلف در شهرستان شوشتر

Fig 8. Percentage of flood risk zones (FRZ) in different functional areas of Shushtar county

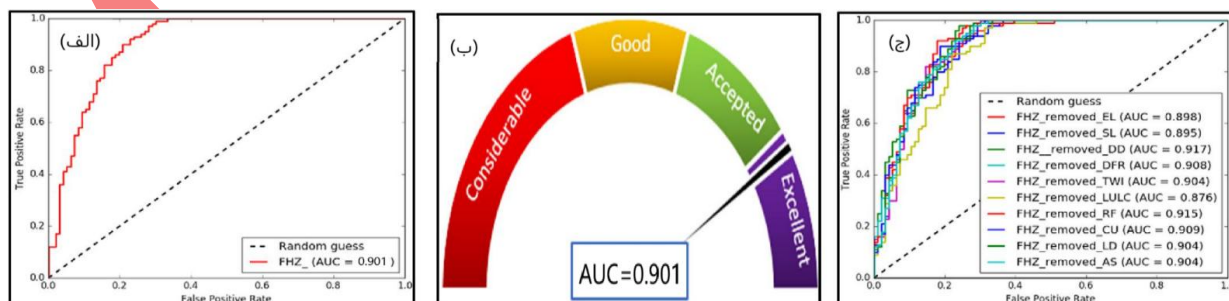


شکل ۹. موقعیت بافت تاریخی شهر شوشتر بر روی نقشه مناطق با ریسک سیل (FRZ)

Fig 9. Location of the historical context (texture) of Shushtar city on the flood risk zones (FRZ) map.

دقت و قابلیت اطمینان مدل

این مطالعه همچنین به ارزیابی کمی مدل AHP برای تهیه نقشه خطر سیل با استفاده از نقشه‌های رخدادهای سیل (شکل ۱) و معیارهای آماری ROC-AUC، RMSE و MSE پرداخته شد. نقشه FHZ مبتنی بر مدل AHP با استفاده از جعبه‌ابزار "ArcSDM" در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد. برای رسم منحنی ROC و محاسبه مقدار AUC، نقشه FHZ با نقاط اعتبارسنجی (از نقشه‌های موجودی سیل و داده‌های مشاهده‌ای استخراج شده) همبستگی داده شد. منحنی ROC-AUC حاصل در شکل ۱۰-الف نمایش داده شده است. سطح عملکرد ROC-AUC به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شود: ضعیف (۰/۵-۰/۷)، خوب (۰/۷-۰/۸)، بسیار خوب (۰/۸-۰/۹) و عالی (۰/۹-۱). مقدار AUC محاسبه شده برای این مطالعه ۰/۹۰۱ (۰/۹۰۱) است که نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل AHP در تهیه نقشه FHZ است. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل AHP برای تولید FHZ در این مطالعه مناسب و قابل اجرا است. به منظور بررسی حساسیت مدل و تأثیر هر پارامتر، مقدار ROC-AUC پس از حذف هر یک از پارامترهای مؤثر در تهیه نقشه FHZ محاسبه شد. بالاترین مقدار AUC (۰/۹۱۷) پس از حذف شاخص (تراکم زهکشی) و پایین‌ترین مقدار AUC (۰/۸۷۶) پس از حذف شاخص (کاربری زمین) به دست آمد. این تحلیل همچنین نشان می‌دهد که شاخص‌های "تراکم زهکشی" و "کاربری زمین" بیشترین تأثیر را در دقت مدل داشته‌اند. علاوه بر این، مقادیر RMSE و MSE به ترتیب ۰/۱۲۶ و ۰/۳۵ محاسبه شدند که نشان‌دهنده خطای پایین و دقت بالای نقشه FHZ تولید شده است. این مقادیر پایین خطا، اعتبار و صحت نتایج مدل AHP را تأیید می‌کند.



شکل ۱۰. (الف) نمودار FHZ ROC-AUC؛ (ب) سرعت سنج نشان‌دهنده مقدار FHZ AUC؛ (پ) نمودار ROC-AUC حذف هر نقشه.

Fig 10. (a) ROC-AUC plot of FHZ; (b) Speedometer shows AUC value of FHZ; (c) ROC-AUC plot of each map removal.

بافت‌های تاریخی میراثی بی‌بدیل است که نه تنها به لحاظ اقتصادی اهمیت دارد، رشته استوار پیوند به گذشته را تشکیل داده و هویت، انسجام و پایداری اجتماع نیز منوط و مرهون به وجود آنهاست؛ از این رو کوچک‌ترین آسیب و خسارت به آنها باید مهم تلقی شود؛ زیرا هیچ ضایعه‌ای به بافت‌های تاریخی ترمیم و جبران کردنی نیست و قابلیت بازگشت به وضعیت اولیه به هیچ وجه نخواهد داشت؛ بنابراین، اتخاذ استراتژی مناسب برای مقابله با سیل و سایر بلایای طبیعی برای به حداقل رساندن اثرات بالقوه در مناطق مستعد خطر منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. در نتیجه، مدیریت پایدار سیل از اهمیت بالایی برخوردار است و عمدتاً به شناسایی مخاطرات بالقوه، آسیب‌پذیری‌ها و مناطق پرخطر به عنوان یک گام ضروری متکی است؛ بنابراین، کار تحقیقاتی فعلی از یک رویکرد جامع برای ترسیم مناطق با خطر سیل در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌کند. هدف این مطالعه ایجاد یک پایگاه داده دقیق است که می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مدیریت سیل پایدار برای منطقه کمک کند. در این مطالعه، به طور هماهنگ مناطق خطر سیل و آسیب‌پذیری را که از طریق مدل MCDM-AHP تهیه شده‌اند، ترکیب شده است تا مناطق با خطر سیل را برای افزایش ظرفیت تاب‌آوری سیل پیش‌بینی شود. فاکتورهای خطر سیل و آسیب‌پذیری بدون چندخطی، توانایی تعیین FRZ را در منطقه تحقیق فعلی به وضوح نشان می‌دهند. روش AHP مبتنی بر MCDM به طور گسترده توسط محققان استفاده شده است و در پیش‌بینی FHZ، FVZ و FRZ قابل اعتمادتر، دقیق‌تر است؛ زیرا انعطاف‌پذیری رتبه‌بندی شاخص‌ها توسط کارشناسان را فراهم می‌کند (Sarkar and Mondal, 2020; Das and Gupta, 2021; Debnath et al., 2023). برای پیش‌بینی منطقه خطر سیل در منطقه، طیف وسیعی از عوامل توپوگرافی، هیدرولوژی، ژئو محیطی، جمعیتی و زیرساختی در نظر گرفته شد و وزن‌های مختلفی به متغیرها اختصاص داده شد، مانند وزن‌های بالاتر به ارتفاع، شیب، تراکم زهکشی و فاصله از رودخانه. نتایج به دست آمده از عملکرد زیرمجموعه‌های شاخص‌ها جهت تولید شاخص خطر سیل نشان می‌دهد: به عنوان مثال، ارتفاع کم با شیب مسطح‌تر و شبکه زهکشی بزرگ‌تر مناطق سیلابی بسیار بالا را نشان می‌دهد و غیره. این یافته، مبنی بر اهمیت بالای عوامل توپوگرافی و هیدرولوژیکی (مانند شیب و ارتفاع) در تعیین خطر سیل، کاملاً با نتایج مطالعات منطقه‌ای و جهانی سازگار است؛ برای مثال، پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه رودخانه یانگ تسه و مطالعه احمدی و همکاران (۲۰۱۹) در مناطق کوهستانی ایران، هر دو با استفاده از مدل AHP، به این نتیجه رسیدند که این عوامل ژئومورفولوژیکی از مهم‌ترین محرک‌های تمرکز رواناب و پتانسیل سیلاب هستند. به طور مشابه، شاخص‌های جمعیتی و زیرساختی مانند تراکم جمعیت، تراکم سکونتگاه و فاصله از شبکه جاده‌ای نقش اصلی را در محاسبه (FVI) با بیش از ۷۰ درصد از وزن‌های تجمعی ایفا می‌کنند. همچنین، سهم بالای شاخص‌های جمعیتی و زیرساختی در محاسبه آسیب‌پذیری سیل، با مطالعات انجام شده در مناطق شهری و تاریخی هماهنگی دارد. به طور مثال، مطالعه (Chen et al, 2022) بر روی اماکن میراث فرهنگی چین صورت گرفت، تأکید کرد که تراکم سکونتگاه و نزدیکی به شبکه‌های زیرساختی، عوامل کلیدی در آسیب‌پذیری فضایی به شمار می‌روند. نتایج مطالعه انجام شده با مطالعات (Gupta and Dixit, 2022) و (Bhuyan et al, 2023) کاملاً سازگار است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که استفاده از شاخص‌ها و مقادیر وزنی از مکانی به مکان دیگر متفاوت است (Sarkar and Mondal, 2020).

شایان ذکر است که نتایج همچنین نشان داد که تفاوت‌هایی در گستره فضایی مناطق با خطر سیل، آسیب‌پذیری و ریسک سیل در حوزه‌های عملکردی وجود دارد. تغییرات مکانی در این معیارها به این معنی است که مناطق با خطر سیل بالا ممکن است در معرض خطر سیل بالا نباشند و بالعکس. اگرچه روش MCDM-AHP نقش مهمی در تعیین رفتار مدل دارد، اما معمولاً به دلیل دلایل مختلف، دارای نواقص قابل توجهی در رتبه‌بندی و وزن‌دهی است. عدم دسترسی به داده‌ها، انتخاب معیارها و عدم آگاهی از ترجیحات تصمیم‌گیرندگان ممکن است به ایجاد نقص در نتیجه مدل منجر شود (Mitra et al., 2022)؛ بنابراین، تحلیل حساسیت برای اطمینان از ارتباط بین اطلاعات ورودی و نتیجه خروجی مدل AHP، با نگاه به نقش عوامل، بسیار توصیه می‌شود (Chen et al., 2013; Mukherjee and Sing, 2020). تحقیق حاضر دو نوع تحلیل حساسیت مدل AHP را برای افزایش عملکرد آن ادغام کرده است. کاهش قابل توجهی بین وزن تجربی و وزن مؤثر در ارزیابی حساسیت تک پارامتری FHZ و FVZ مشاهده شده است. به طور مشابه، تحلیل حساسیت حذف نقشه، تغییر جزئی در شاخص حساسیت (SI) را بین شاخص‌های در نظر گرفته شده برای هر دو FHZ و FVZ تحت تأثیر اختصاص وزن‌ها، رتبه‌ها و حذف لایه‌ها نشان داد. دقت مدل و اعتبارسنجی با استفاده از ROC-AUC، MSE و RMSE به طور قابل توجهی

اثربخشی مدل MCDM-AHP را در نقشه‌های منطقه‌بندی خطر سیل برجسته شده است. این مدل همچنین خروجی دقیق و قابل اعتمادی را برای تحقق هدف تولید کرد و کاربرد بیشتر روش‌شناسی‌ها را برای تحقیقات آینده در مناطق مختلف مستعد سیل در سراسر جهان توصیه می‌کند. این مطالعه محدودیت‌های عمده‌ای نداشت، اگرچه MCDM-AHP دقت بالایی داشت اما می‌توان با استفاده از مجموعه داده‌های با وضوح بالا، سایر روش‌های MCDM و یادگیری ماشین (ML) و تکنیک‌های حساسیت دیگر نیز ممکن است به نتایج بهتری دست‌یافت. در این تحقیق ما فرض کردیم که مدل MCDM-AHP برای مناطق با کمبود داده بهترین است. سیل یکی از ویرانگرترین بلایای طبیعی جهان است که به طور قابل توجهی با خسارات بالقوه ناشی از پدیده‌های طبیعی و انسانی مرتبط است؛ بنابراین، ارزیابی دقیق منطقه با خطر سیل، از سطح جهانی تا خرد، برای کمک به اقدامات کاهش اثرات منفی ضروری است. همراه با کاربرد گسترده روش‌های پیشنهادی در این تحقیق، این امر به بهبود اطلاعات در مورد مخاطرات، آسیب‌پذیری و ریسک سیل کمک خواهد کرد. علاوه بر این، این مطالعه نه تنها بحث‌های علمی را تکمیل می‌کند، بلکه راه‌حل‌های عملی برای تدوین بهتر سیاست‌های مدیریت سیل پایدار و پیامدهای آن ارائه می‌دهد. با یافته‌های خود، تحقیق فعلی گستره وسیعی از بینش‌ها را در مورد خطر سیل در شهر شوشتر به‌ویژه بافت تاریخی و اماکن تاریخی ثبت شده میراث جهانی یونسکو ارائه خواهد کرد. این بینش‌ها صرفاً یک نقشه خطر فنی نیستند، بلکه سندی برای مدیریت سازگاری با تغییر اقلیم ۳۹ محسوب می‌شوند. با شناسایی دقیق مناطق پرخطر، این مطالعه ابزاری عملی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و افزایش تاب‌آوری میراث جهانی شوشتر در برابر رویدادهای حدی اقلیمی آتی فراهم می‌کند. این رویکرد، گذار از مدیریت بحران واکنشی به یک استراتژی پیشگیرانه و مبتنی بر سازگاری اقلیمی را ممکن می‌سازد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به‌منظور تهیه نقشه مناطق در معرض خطر سیل (FRZ) در شهر شوشتر، با تأکید بر حفاظت از بافت تاریخی و میراث جهانی ثبت‌شده در یونسکو، صورت گرفته است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند بینش‌های حیاتی برای تدوین یک طرح کارآمد کاهش و مدیریت سیل را غنی کند. حوزه‌های عملکردی (RCs) منطقه به‌عنوان واحدهای فضایی سطح خرد در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. با بهره‌گیری از روش‌های قدرتمند GIS-AHP (سیستم اطلاعات جغرافیایی - فرایند تحلیل سلسله مراتبی)، کارایی و سازگاری نتایج به‌وضوح نشان داده شده است. توانایی بالای این مدل در شناسایی دقیق مناطق پرخطر سیل در محدوده مورد مطالعه، استحکام و قابلیت اطمینان مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP را تأیید می‌کند. علاوه بر این، در نظر گرفتن عوامل فیزیکی و اجتماعی در این روش، نقش مهمی در محاسبه شاخص خطر سیل (FHI) و شاخص آسیب‌پذیری سیل (FVI) منطقه ایفا کرده است. نتایج نشان می‌دهد که ۱۱/۱ درصد از مساحت منطقه در دسته آسیب‌پذیری بسیار بالا (FVZ) و ۲۳/۲۸ درصد در دسته آسیب‌پذیری بسیار پایین (FVZ) قرار دارد. همچنین، ۱۱ درصد از مساحت جغرافیایی منطقه به‌عنوان مناطق با ریسک بسیار بالای سیل (FRZ) و ۲۲/۳ درصد به‌عنوان مناطق با ریسک بسیار پایین سیل (FRZ) طبقه‌بندی می‌شوند. تحلیل نتایج نشان داد که ارتفاع با ۳۱/۹۶ درصد، بیشترین اختلاف را بین مقادیر تجربی و میانگین مؤثر نشان می‌دهد، درحالی‌که کمترین اختلاف با ۰/۹۶ درصد در تراکم خطواره مشاهده شد. هدف از انجام تحلیل حساسیت، بررسی میزان تأثیر تغییرات در ورودی‌های مدل (مانند حذف یک نقشه یا تغییر وزن معیارها) بر خروجی‌های آن (میزان خطر سیل و آسیب‌پذیری سیل) است. در این راستا، با حذف یکی از نقشه‌ها و کاهش ۳۷/۲۹ درصدی وزن معیار تراکم جمعیت نسبت به میانگین وزن آن، مشاهده شد که بخش قابل توجهی از مساحت منطقه، تغییراتی (افزایش یا کاهش) در میزان خطر سیل و آسیب‌پذیری نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف شناسایی مناطق در معرض خطر سیل و بررسی نقش عوامل مختلف منطقه‌ای در ایجاد این خطر انجام شده است. تحلیل انجام‌شده می‌تواند درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیر هر پارامتر بر وقوع سیل و همچنین پتانسیل تغییر این تأثیرات فراهم آورد. از اهمیت ویژه یافته‌های این مطالعه، کمک به تصمیم‌گیران در تدوین سیاست‌های مقاوم‌سازی در برابر سیل با رویکرد حفاظت از اماکن تاریخی ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو است. این یافته‌ها همچنین می‌تواند در توسعه زیرساخت‌های مورد نیاز در منطقه، با در نظر گرفتن ملاحظات حفاظتی این اماکن، مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه با وجود برخی محدودیت‌ها، یافته‌های قابل اعتمادی را در منطقه با کمبود داده ارائه کرده است. روش GIS-AHP، به‌عنوان روشی که نیازمند اولویت‌بندی داده‌های مکانی و دانش تخصصی است، ذاتاً با چالش‌هایی از جمله عدم قطعیت‌ها همراه است. در این پژوهش، هنگام استفاده از این روش، با

چالش‌های اساسی در انتخاب شاخص‌ها، محاسبه وزن آن‌ها و ارزیابی دقت مدل مواجه شدیم. دقت نتایج حاصل از AHP به شدت وابسته به انتخاب صحیح پارامترها و استفاده از منابع داده معتبر است. استفاده از منابع داده نامعتبر می‌تواند منجر به نتایج گمراه‌کننده و کاهش دقت مدل شود. با این وجود، می‌توان دقت این پژوهش را با بهره‌گیری از نظرات کارشناسان با تخصص‌های گوناگون و استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر، بهبود بخشید و ارزیابی دقیق‌تری از آن ارائه داد. ارزیابی حساسیت انجام‌شده بر روی مدل AHP، نوآوری این پژوهش را نشان می‌دهد. نقشه خطر سیل (FHI) منطقه با استفاده از منحنی (ROC-AUC) و روش‌های آماری مختلف اعتبارسنجی شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل AHP در شناسایی مناطق مستعد سیل عملکرد مؤثری داشته است که این امر با امتیاز بالاتر از ۹۰ درصد و مقادیر MSE و RMSE کمتر از ۴۰ درصد تأیید می‌شود. این دقت بالا، برتری مدل را نسبت به بسیاری از مطالعات مشابه در این حوزه نشان می‌دهد؛ برای مثال، درحالی‌که پژوهش (Mohammadi et al, 2020 and Mitra et al, 2022) دقت ROC-AUC را در محدوده ۸۰ تا ۸۹ درصد گزارش کرده‌اند، دقت بالای ۹۰ درصد در این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد قوی‌تر و قابل اعتمادتر مدل در منطقه مورد مطالعه است. تحلیل حساسیت با حذف هر یک از شاخص‌ها نشان داد که دقت مدل (بر اساس ROC-AUC) در تمامی نقشه‌های FHI حاصل، بالاتر از ۸۰ درصد بوده است. علاوه بر این، تحلیل همبستگی چندمتغیره، رابطه مثبتی بین مناطق با ریسک بالای سیل (خرد) و اثرات واقعی سیل را تأیید کرد. بر اساس این نتایج، بیش از ۲۸ درصد از کل مساحت منطقه در سطح خطر سیل بالا و بسیار بالا قرار دارد. در این میان، حوزه عملکردی شعبه شرقی بیشترین گستره فضایی خطر سیل را با بیش از ۱۰/۴ درصد در مقایسه با سایر نواحی نشان می‌دهد. یافته‌های این پژوهش، بینش‌های ارزشمندی در مورد سطوح مختلف مخاطرات، آسیب‌پذیری و ریسک سیل در منطقه ارائه می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به‌منظور افزایش تاب‌آوری بافت تاریخی و حمایت از مدیریت سازگاری اقلیمی، پیشنهادهای کاربردی زیر ارائه می‌شود:

- اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی در مناطق با ریسک بسیار بالای سیل (FRZ): فوراً اقدامات مهندسی سازه‌ای و غیرسازه‌ای، به‌ویژه تقویت زیرساخت‌ها و بناهای تاریخی واقع در ۱۱ درصد مناطق با ریسک بسیار بالای سیل، و به‌طور خاص در حوزه شعیه شرقی، در اولویت برنامه‌های حفاظتی میراث فرهنگی قرار گیرند.

- بازنگری در طرح‌های توسعه: نقشه‌های ریسک و آسیب‌پذیری (FRZ) و (FVZ) باید به‌طور رسمی به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی کلیدی در طرح‌های جامع و تفصیلی شهری شوشتر ادغام شوند تا از هرگونه توسعه و یا تغییر کاربری در مناطق بسیار پرخطر جلوگیری شود.

- توسعه سیستم هشدار سیل محلی: یک سیستم هشدار سریع و محلی سیل (EWS) برای مناطق بافت تاریخی و حوزه‌های عملکردی پرخطر (مانند شعبه شرقی) با استفاده از داده‌های بارش آبی و ارتفاع آب رودخانه تدوین و نصب شود تا زمان واکنش مدیریت بحران افزایش یابد.

- کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی: با توجه به سهم بالای عوامل زیرساختی و جمعیتی در شاخص آسیب‌پذیری، سیاست‌های مدیریتی باید بر کاهش تراکم جمعیت در نزدیکی رودخانه و تقویت شبکه‌های زیرساختی قدیمی در بافت تاریخی متمرکز شوند تا آسیب‌پذیری اجتماعی و فیزیکی کاهش یابد.

اگرچه دامنه این پژوهش محدود است، اما می‌توان با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مختلف، تحلیل و مدیریت ریسک را به‌صورت جامع‌تری بررسی کرد. همچنین، در پژوهش‌های آتی می‌توان به ارزیابی خطرات مرتبط با برنامه‌ریزی کاربری اراضی و پوشش زمین، مدیریت منابع، تحلیل پناهگاه‌های سیل و سایر جنبه‌های مرتبط در منطقه مورد مطالعه، با تأکید ویژه بر حفاظت از اماکن تاریخی ثبت‌شده در سازمان یونسکو پرداخت. این شامل بررسی تأثیر سیل بر این اماکن و ارائه راهکارهایی برای کاهش آسیب‌پذیری آن‌ها می‌شود. در نهایت، یافته‌های این مطالعه می‌تواند راهنمای مفیدی برای سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان در جهت تدوین استراتژی‌های سازگاری اقلیمی و مدیریت پایدار ریسک، با در نظر گرفتن اهمیت حفاظت از میراث فرهنگی در برابر تهدیدات فزاینده تغییر اقلیم، باشد.

- Agapiou, A. (2021). Remote sensing heritage in a changing climate: challenges and opportunities, *Journal of Cultural Heritage*. 42, 130-139.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.08.005>
- Agapiou, A., & Lysandrou, V. (2022). Satellite remote sensing for cultural heritage monitoring: a review. *Remote Sensing Applications, Society and Environment*. 27, 100698. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100698>
- Ahmed, N., Kumar, S., Chakraborty, T., & Das, S. (2022). Flood susceptibility analysis using machine learning algorithms: A case study from the Sundarbans region, India, *Science of The Total Environment*. 847, 157512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157512>
- Altaf, S., Meraj, G., & Romshoo, S.A. (2013). Morphometric analysis to infer hydrological behaviour of the Liddar watershed, Western Himalaya, India, *Geography Journal*. 2013, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2013/178021>
- Arnous, M. O., El-Rayes, A. E., El-Nady, H., & Helmy, A. M. (2022). Flash flooding hazard assessment, modeling, and management in the coastal zone of Ras Ghareb City, Gulf of Suez, Egypt, *Journal of Coastal Conservation*. 26(6), <https://doi.org/10.1007/s11852-022-00916-w>
- Aryal, S. K., Mein, R. G., & O'Loughlin, E. M. (2003). The concept of effective length in hillslopes: assessing the influence of climate and topography on the contributing areas of catchments, *Hydrological Processes*. 17(1), 131-151. <https://doi.org/10.1002/hyp.1137>
- Arrighi, C. (2021). Economic analysis of flood impacts: a review of resilience metrics and loss models, *Water Security*. 15, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100118>
- Bakhtiari M, Jahantab Z (2022). Spatial modeling of floods using an artificial neural network (ANN) and analytical functions of GIS, *Climate Research*. 13(49), 177-194. [In Persian].
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modele a base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrological Sciences Journal*. 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bhuyan, A., Dutta, D., & Sarma, A.K. (2023). Flood risk and vulnerability assessment in the Brahmaputra River basin, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 91, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103649>
- Bui, D. T., Hoang, N. D., Pham, T. D., Ngo, P. T. T., Hoa, P. V., Minh, N. Q., et al. (2019). A new intelligence approach based on GIS-based Multivariate Adaptive Regression Splines and metaheuristic optimization for predicting flash flood susceptible areas in high-frequency tropical typhoon areas, *Journal of Hydrology*. 575, 314-326. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.023>
- Bunmi Mudashiru, R., Abubakar, I.R., & Oloyede, K.S. (2022). GIS-based flood risk assessment using AHP and MCDA methods: A case study of Kano State, Nigeria, *Sustainability*. 14(13), 7694. <https://doi.org/10.3390/su14137694>
- Chakraborty, T., & Mukhopadhyay, S. (2019). Flood risk assessment using multi-criteria decision analysis: A case study from Sundarbans, India. *Environment, Development and Sustainability*. 21(3), 1093-1114. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0042-5>
- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment, *Environmental Modelling & Software*. 95, 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>
- Chen, S., Chen, X., Wu, X., Wang, H., Li, X., & Chen, L. (2022). Integration of remote sensing and GIS for flood monitoring: A comprehensive review, *Remote Sensing*. 14(11), 2598. <https://doi.org/10.3390/rs14112598>
- Chen, W., Li, H., Hou, E., Wang, S., Wang, G., Panahi, M., & Ahmad, B.B. (2013). GIS-based groundwater potential analysis using novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models, *Water Resources Management*. 32(1), 249-270. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1859-5>
- Chen, Y., Hong, Y., Li, X., & Chen, H. (2011). A stepwise-multivariate decision tree model for flood forecasting, *Water Resources Management*. 25(9), 2271-2289. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9791-3>
- Chezgi, J. and Hamed, E. (2023). Flood prioritization of Sarbaz River sub-basins using the SWAT model, *Journal of drought and climate change research*. 1(3), 73-86. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6478.1026>. [In Persian].
- Das, S., & Gupta, A. (2021). Flood risk assessment and management using GIS: A case study of West Bengal, India, *Environmental Earth Sciences*. 80(12), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09679-3>
- Debnath, J., Ahmed, N., & Bhowmik, S. (2017). Flood vulnerability assessment of the Sundarban biosphere reserve region, *Environmental Earth Sciences*. 76(12), 439. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6797-2>
- Debnath, J., Ahmed, N., & Dutta, S. (2022). Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment for Sundarban biosphere reserve, India, *Environmental Science and Pollution Research*. 29(45), 67603-67623. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20045-2>
- Debnath, J., Ahmed, N., & Dutta, S. (2023). A novel fuzzy-based flood vulnerability assessment using GIS and AHP for the Sundarban region, *Journal of Environmental Management*. 325, 116574.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116574>

Degiorgis, M., Gnecco, G., Gorni, S., Rampa, G., & Vernazza, G. (2012). Classification of multispectral and SAR images for flood mapping, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 50(11), 4375-4392.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2193651>

Eghtesadifard, M., Afkhami, P., & Baziar, M. (2020). A comprehensive framework for flood risk assessment in urban areas, *Journal of Hydroinformatics*. 22(4), 856-873. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.014>

Farhadi, H., Lu, M., Srinivasan, R., & Banasik, K. (2022). Flash flood susceptibility assessment using integrated remote sensing and GIS approach, *Journal of Hydrology*, 606, 127471. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127471>

Figueiredo, R., Tedim, F., Jorge, L., & Silva, S. (2020). Flood risk assessment and management for cultural heritage sites, *Cultural Heritage and Disaster Risk Reduction*. 75-94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27825-7_4

Gerster, M., Gassner, C., & Ernst, A. (2022). Monitoring natural hazards using remote sensing and GIS technologies, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 112, 102895.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102895>

Ghawana, T., Zaveri, A., & Murugan, K. (2021). Remote sensing for disaster monitoring and management, *Geospatial Technologies for Water Resources Management*. 285-312. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86040-6_11

Ghosh, S., & Dey, U.K. (2021). Machine learning applications for flood prediction and risk assessment, *Machine Learning for Water Resources Engineering and Hydrology*. 2021, 241-268.

<https://doi.org/10.1002/9781119758987.ch10>

Gupta, A., & Dixit, R. (2022). GIS-based multi-criteria decision analysis for flood vulnerability assessment, *Water Resources Management*. 36(6), 1927-1945.

<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03138-8>

Hajian, Ö., Yusefi, E. and Monshizadeh Naeen, H. (2025). Evaluating hybrid models and google earth engine for predicting climate change impacts on runoff in the kasilian catchment, northern iran, *journal of drought and climate change Research*. 2(4), 141-160. [In Persian].

<https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8683.1102>

Hishe, S., Asmah, R., & Lambin, E.F. (2020). Remote sensing for land cover and land use change detection, *Land Use Policy*. 99, 104895.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104895>

Jahan, C. S., Rahaman, M. F., Arefin, R., Ali, M. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Delineation of groundwater potential zones of Atrai-Sib River basin in north-west Bangladesh using remote sensing and GIS techniques, *Sustainable Water Resources Management*. 5(2), 689–702. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0240-x>

Jenks, G.F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*. 7, 186-190.

Jong, E. (2019). Understanding multicollinearity in regression analysis, *Statistical Methodology*. 83, 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.stamet.2019.02.001>

Khosravi, K., Nohani, E., Maroufnia, E., & Pourghasemi, H.R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping, *Environmental Earth Sciences*. 75(6), 435. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5092-z>

Khosravi, K., Pham, B.T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., & Bui, D.T. (2018). A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling, *Water*. 10(7), 974.

<https://doi.org/10.3390/w10070974>

Kittipongvises, S., Phetrak, A., Rattanapun, P., Brundiers, K., Buizer, J. L., & Melnick, R. (2020). AHP-GIS analysis for flood hazard assessment of the communities nearby the world heritage site on Ayutthaya Island, Thailand, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 48(November 2019), 101612.

<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101612>

Kotecha, M., Patel, D., & Trivedi, Y. (2023). Morphometric analysis for hydrological assessment of a watershed using GIS, *Environmental Monitoring and Assessment*. 195(3), 382. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10944-8>

Kumar, S., Snehmani, Srivastava, P. K., Gore, A., & Singh, M. K. (2016). Fuzzy-frequency ratio model for avalanche susceptibility mapping, *International Journal of Digital Earth*. 9(12), 1168–1184.

<https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1157140>

Lahon, D., Sahariah, D., Debnath, J., Nath, N., Meraj, G., Kumar, P., et al. (2023). Assessment of ecosystem service value in response to LULC changes using geospatial techniques: a case study in the merbil wetland of the Brahmaputra valley, Assam, India, *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 12(4), 165.

<https://doi.org/10.3390/ijgi12040165>

Li, X., Wang, Y., Chen, X., & Li, H. (2019). Sensitivity analysis in multi-criteria decision making for water resource management, *Water Resources Management*. 33(9), 3043-3061. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02297-5>

Lin, H., & Billa, L. (2021). Flood susceptibility mapping using remote sensing and machine learning algorithms, *Remote Sensing*. 13(4), 559.

<https://doi.org/10.3390/rs13040559>

Majumder, M. (2015) Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations, *springer verlag Singapore*. 35-47. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-73-3>

- Mekonnen, M., Hailu, A., & Feleke, D. (2023). Application of AHP for water resource management, *Water Resources Management*. 37(3), 1241-1259.
<https://doi.org/10.1007/s11269-023-03423-1>
- Mitra, A., & Das, M. (2023). Multi-criteria decision-making approaches for flood risk assessment, *Environmental Impact Assessment Review*. 99, 107003.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107003>
- Mitra, A., Das, M., & Ray, P. (2022). Fuzzy AHP-based multi-criteria flood risk assessment, *Water Resources Planning and Management*. 148(8), 04022038.
<https://doi.org/10.1061/JWWRD5.WRENG-6798>
- Mitra, A., Das, M., & Saha, S. (2022). Machine learning approaches for flood prediction: A comprehensive review, *Water Resources Research*. 58(6), e2021WR031911. <https://doi.org/10.1029/2021WR031911>
- Mitra, R., Saha, P., & Das, J. (2022). Assessment of the performance of GIS-based analytical hierarchical process (AHP) approach for flood modelling in Uttar Dinajpur district of West Bengal, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 13(1), 2183–2226.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2112094>
- Mojaddadi, H., Pradhan, B., Nampak, H., Ahmad, N., & Ghodsian, N. (2017). Ensemble machine-learning-based techniques for land-use/cover change mapping, *Remote Sensing*. 9(10), 954. <https://doi.org/10.3390/rs9100954>
- Mohammadi, A., Kamran, K.V., Karimzadeh, S., Shahabi, H., & Al-Ansari, N. (2020). Flood detection and susceptibility mapping using sentinel-1 time series, alternating decision trees, and bag-adtree models, *complex*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4271376>
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Landson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*. 5(1), 3-30.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Mukherjee, S., & Singh, R.P. (2020). Detecting CMIP5 climate change signals and extremes over India using Ensemble Kalman filter-based data assimilation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 59(7), 1173-1191.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0153.1>
- Nasiri, V., Sadeghi, S.M.M., Bagherabadi, R. *et al.* (2022). Modeling wildfire risk in western Iran based on the integration of AHP and GIS, *Environ Monit Assess*. 194, 644. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10318-y>
- Onușluel Gül, G. (2013). Estimating flood exposure potentials in Turkish catchments through index-based flood mapping, *Natural Hazards*. 69(1), 403–423.
<https://doi.org/10.1007/s11069-013-0717-8>
- Pathan, A., Matee, S., Shaikh, R., & Devare, D. (2022). GIS-based flood vulnerability assessment: A case study of Maharashtra, India, *Journal of Geographic Information System*. 14(2), 265-281. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2605-3_5
- Peng, Y., & Zhang, H. (2022). Spatial distribution analysis of flood risks using GIS-based techniques, *Water Resources Research*. 58(4), e2021WR030869.
<https://doi.org/10.1029/2021WR030869>
- Pham, B.T., Pham, Q.T., & Van Doan, T. (2021). GIS-based assessment of flood susceptibility using machine learning methods. *Environment, Development and Sustainability*. 23(5), 7279-7297. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00871-z>
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Regional landslide susceptibility assessment using multi-criteria decision analysis and fuzzy logic, *Environmental Earth Sciences*. 61(3), 595-611. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0382-0>
- Pradhan, B., & Youssef, A.M. (2010). A comparative study for flash flood susceptibility assessment using multi-criteria decision analysis, *Natural Hazards*. 53(3), 547-565. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9443-7>
- Radwan, F., Al-Mukhaini, A., Al-Rashdi, A., Al-Kandari, A., & Al-Rashidi, M. (2019). Multi-criteria flood risk assessment using AHP in Qatar, *Water Supply*. 19(6), 1800-1808. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.043>
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Noormohamadi, F. (2016a). GIS-based flood susceptibility assessment using frequency ratio, *Quaternary International*. 385, 196-211.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.070>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besalatpour, A.A. (2016b). Flood hazard mapping using multi-criteria decision analysis, *Hydrological Processes*. 30(4), 554-567.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10569>
- Romero-Ramos, J. A., Gil, J. D., Cardemil, J. M., Escobar, R. A., Arias, I., & Pérez-García, M. (2023). A GIS-AHP approach for determining the potential of solar energy to meet the thermal demand in southeastern Spain productive enclaves, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 176, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113205>
- Rostami, M., Hosseinzadeh, M. M. and Esmaili, R. (2021). Assessment of bank-river stability versus erosion and factors for its management strategy in the Vaz River, Mazandaran province, *Researches in Earth Sciences*. 11(4), 1-14.
<https://doi.org/10.52547/esrj.11.4.1>

Roy, S., Bose, A., & Chowdhury, I. R. (2021). Flood risk assessment using geospatial data and multi-criteria decision approach: a study from historically active flood-prone region of Himalayan foothill, India, *Arabian Journal of Geosciences*. 14(11). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07324-8>

Saber, M., Boulmaiz, T., Guermoui, M., Abdrabo, K.I., Kantoush, S.A., Sumi, T., & Mabrouk, E. (2022). Examining lightGBM and CatBoost models for wadi flash flood susceptibility prediction, *Geocarto International*. 37(25), 7462-7487. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1974959>

Saffari A, Ghanavati E, Alipour Dezdouli Asl H. (2023). Investigation of morphology changes in Karun River and its hazards (Case Study: Bandagir to Khorramshahr), *jgs*. 23(68), 12. [doi:10.52547/jgs.23.68.199](https://doi.org/10.52547/jgs.23.68.199)

Saha, A.K., & Agrawal, S. (2020). Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj district, India: a GIS and remote sensing study, *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 5(2), 13. <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00073-1>

Salvati A, Moghaddam Nia A, Salajegheh A, Ghaderi K, Talebpour Asl D, Al-Ansari N, et al (2023). Flood susceptibility mapping using support vector regression and hyper-parameter optimization, *Journal of Flood Risk Management*. 16(4), e12920. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12920>

Shahabi H (2021). Application of artificial neural network, frequency ratio, and evidential belief function models in preparing of flood susceptibility map in Haraz watershed: A plan for urban flood risk studies, *Research and Urban Planning*. 12(45):181-202. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/jupm.2021.4245>

Saaty, T.L. (1980). The analytic hierarchy process. McGraw-Hill International Book Co.

Sanyal, J., Densmore, A.L., & Carboneau, P. (2014). Analysing the effect of land-use/cover changes at sub-catchment levels on downstream flood peaks, *Catena*. 118, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.015>

Sarkar, D., Mondal, P., & Saha, S. (2020). Flood vulnerability mapping using frequency ratio (FR) model: a case study on Kulik river basin, Indo-Bangladesh Barind region, *Applied Water Science*. 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1102-x>

Sarkar, D., Saha, S., & Mondal, P. (2022). GIS-based frequency ratio and Shannon's entropy techniques for flood vulnerability assessment in Patna district, Central Bihar, India, *International Journal of Environmental Science and Technology*. 19(9), 8911-8932. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03627-1>

Shahsavari, A.H. (2023). Video / "Leak in shushtar hydrostructure", an old, repetitive and ineffective warning! Retrieved Oct 12, 2023, from <https://www.isna.ir/xdKvQn>

Shahsavari, A., Khodaei, K., Asadian, F., & Ghobadi, H. (2012). Groundwater pesticide residue in the southwest of Iran-Shushtar plain, *Environmental Earth Sciences*. 65, 231-239. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1090-0>

Sheikhinia, H. (2020). Developing Shushtar tourism by reviving historic houses. Retrieved June 16, 2020. <https://www.mehrnews.com/xS4BY>

Statistical Centre of Iran. (2023) Statistical yearbook of Khuzestan province. <https://amar.org.ir/>

Statistical Centre of Iran. (2016) Statistical yearbook of Khuzestan province. <https://amar.org.ir/>

Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using the analytic hierarchy process, *Natural Hazards*. 68(2), 569-585. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>

Swets, J.A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*. 240(4857), 1285-1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>

Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M., & Wilson, T. L. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1511-1525. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1013>

Tercan, E., Dereli, M. A., & Saracoglu, B. O. (2022). Location alternatives generation and elimination of floatovoltaics with virtual power plant designs, *Renewable Energy*. 193, 1150-1163. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.145>

UNESCO. (2023). The list of world heritage sites in Iran. UNESCO World Heritage Centre.

Vivekananda, G.N., Swathi, R., & Sujith, A.V.L.N. (2021). Multi-temporal image analysis for LULC classification and change detection, *European Journal of Remote Sensing*. 54(sup2), 189-199. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1771215>

Vogel, Alexius (1987), "Die historische entwicklung der gewichtsmauer", in garbrecht, g nther (ed.), *Historische Talsperren*, vol. 1, Stuttgart: Verlag Konrad Wittwer, pp. 47-56 (50), ISBN 3-87919-145-X.

Voice of Heritage. (2019). Floods drowned half of Shushtar's ancient sites/Possibility of water corridors bursting in Shushtar's water structures/Mizan dam and Sassanid structures submerged/Roofs of Qajar houses collapsed in the historical context. Retrieved Apr 3, 2019, from <https://www.sedayemiras.ir/?p=8924>

Vojinovic, Z., Sahu, Y., Torres, A.S., Abebaw, H., Melgani, F., & Monforti, F. (2016). An integrated approach to address spatial flood risk assessment, *Journal of Flood Risk Management*. 9(3), 282-295.

<https://doi.org/10.1111/jfr3.12203>

Yusefi, E., Kaffash, M. and shariati, M. (2024). Spatial analysis of flood risk in Taba's watershed using satellite images and geographic information system (GIS), *Journal of Drought and Climate change Research*. 2(2),105-118. [In Persian].

<https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7489.1066>

Zanganeh Asadi MA, Amir Ahmadi A, Naemitabar M (2021). Efficiency evaluation of the VIKOR, L-THIA, and Artificial Neural Network (ANN) models in flood zone analysis (case study: Khorasan Razavi Province), *Iranian Journal of Ecohydrology*. 8(1):89-108. [In Persian].

<https://doi.org/10.22059/ije.2021.305168.1346>

Zhang, L., Yang, X., Wang, S., Li, H., & Wang, J. (2022). Integration of remote sensing and GIS for flood risk assessment: A review, *Remote Sensing*. 14(10), 2378. <https://doi.org/10.3390/rs14102378>

سازمان اسناد و کتابخانه ملی
جمهوری اسلامی ایران