

Spatio-temporal analysis of earthquake occurrences using spatial statistics in a Geographic Information System (GIS) environment: A case study of Northwestern region of Iran

Roya Moghabeli ¹, Masoumeh Raji Khah ², Alireza Mohammadi ³ 

1. Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: roya.moghabeli@gmail.com

2. Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: m.rajikhah@gmail.com

3. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Email: a.mohammadi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

3 July 2025

Revised:

7 October 2025

Accepted:

16 November 2025

Available online:

20 December 2025

Keywords:

Urban Vulnerability,
Spatio-Temporal Analysis,
Earthquake,
Geographic Information
System (GIS),
Northwestern Iran.

ABSTRACT

Spatiotemporal analysis of earthquakes plays a critical role in identifying high-risk areas, prioritizing interventions, and reducing seismic vulnerability. This study aimed to analyze seismic clusters across the northwest region of Iran using data from over 3,500 earthquake events with magnitudes of 4.0 and above, recorded between 1996 and 2024. The data were obtained from the Seismological Center of the Institute of Geophysics, University of Tehran, and analyzed using Geographic Information Systems (GIS) techniques such as Kernel Density Estimation (KDE), Getis-Ord Gi* hot spot analysis, and Moran's I spatial autocorrelation. Results showed that the highest concentration of earthquakes occurred near major fault lines such as Tabriz, Khoy, Salmas, and Makran, with around 62% of urban settlements located within a 14-kilometer radius of these epicenters. Additionally, 75% of recorded events had focal depths below 15 kilometers, increasing the potential for severe damage in densely built urban areas. Hot spot clusters were also identified in heavily populated cities, aligning with zones of high vulnerability. The study's novelty lies in integrating advanced spatiotemporal analytics, multidimensional vulnerability indices, and regional-scale modeling using GIS tools to develop a localized framework for seismic risk assessment. Findings highlight the need for strict construction standards, early warning systems, continuous fault monitoring, and up-to-date spatial databases. The application of multi-criteria decision-making (MCDM), Random Forest algorithms, and Artificial Neural Networks (ANN) in disaster planning is also recommended. One limitation is the lack of detailed geotechnical data at the regional scale, which future research can address.

Cite this article: Moghabeli, R., Raji Khah, M., Mohammadi, A. & Rahmati, A. (2025). Spatio-temporal analysis of earthquake occurrences using spatial statistics in a Geographic Information System (GIS) environment: A case study of Northwestern region of Iran. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 13 (4), 23-41.

<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.393830.2058>



© The Author (s)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Earthquake vulnerability in seismically active regions such as northwestern Iran presents a persistent and multifaceted challenge for urban planning and disaster risk management. The region's complex tectonic structure, high density of active fault systems—including the Tabriz, Salmas, and Maku faults—and rapid urbanization processes make it one of the most hazard-prone areas in the country. Despite a long history of destructive earthquakes, comprehensive spatial assessments of seismic vulnerability at the regional scale remain scarce. Most prior studies have focused on individual cities or applied single-method analyses, limiting the ability to identify macro-scale spatial patterns and formulate coordinated resilience strategies. Addressing this gap, the present study applies a spatiotemporal approach using advanced geospatial technologies to assess seismic exposure, identify high-risk urban centers, and develop a regionally adapted vulnerability model. The study is theoretically grounded in the integration of physical, environmental, and socio-economic indicators of vulnerability, and contributes to the development of spatial decision-support tools for earthquake risk reduction in Iran and similar seismic zones.

Methodology

This research adopts a descriptive-analytical methodology based on advanced spatial analysis techniques within a Geographic Information System (GIS) framework. The dataset includes more than 3,500 recorded earthquakes of magnitude 4.0 and above during the period 1996–2024, extracted from the Seismological Center of the Institute of Geophysics, University of Tehran. Earthquake records were geocoded and analyzed using several complementary methods. First, Kernel Density Estimation (KDE) was used to visualize the spatial intensity of seismic events and identify seismic hotspots. Second, spatial clustering analysis using the Local Moran's I index revealed the degree of spatial autocorrelation and highlighted statistically significant clusters. Third,

Getis-Ord G_i^* hot spot analysis was applied to pinpoint zones with elevated seismic activity and identify cities situated within them. Buffer analysis determined the proximity of urban settlements to earthquake epicenters and was used to generate proximity-based vulnerability zones. Urban boundary data, population density, and infrastructure layers were overlaid with seismic data to assess spatial vulnerability at the city level. The resulting maps were synthesized to produce a final vulnerability model, facilitating prioritization and crisis planning.

Results and discussion

The KDE analysis demonstrated strong spatial clustering of earthquakes along primary fault zones, particularly in northwestern areas near Tabriz, Urmia, Khoy, and Maku. These regions exhibited the highest seismic density throughout the 28-year study period. Hot spot analysis using the G_i^* index confirmed that cities like Tabriz, Urmia, and Salmas fall within statistically significant high-risk clusters. Local Moran's I values indicated non-random distribution of seismic events, highlighting spatial dependence in fault-related earthquake occurrence. Buffer analysis revealed that approximately 62% of the 40 regional cities are located within 14 kilometers of the nearest earthquake epicenter, and thus face substantial seismic exposure. Furthermore, 75% of recorded earthquakes had focal depths less than 15 km, increasing the potential for severe surface-level damage in densely populated urban areas. Risk prioritization analysis identified Tabriz, Urmia, Maragheh, and Sarab as the most vulnerable cities, due to their proximity to fault lines, high population densities, and weak infrastructure resilience.

In comparing these findings with prior research in cities such as Tehran (Afsari et al., 2023), Sanandaj (Yariyan et al., 2020), and Istanbul (Alemdar, 2025), the current study introduces a unique contribution by combining KDE, G_i^* , and Local Moran's I in a multi-method framework. This integration enables a richer understanding of regional-scale patterns of vulnerability. Unlike single-city studies or those based

solely on AHP or MCDM methods, the present research offers a holistic, geospatially-driven model that is more scalable and adaptable to large-scale disaster planning. The limitations of the study include the exclusion of earthquakes under magnitude 4.0 and the lack of detailed geotechnical and construction quality data, which should be addressed in future research. Nevertheless, the analysis sets a solid empirical foundation for further expansion.

Conclusion

This study conducted a spatiotemporal analysis of earthquake vulnerability in northwestern Iran using advanced GIS-based techniques and seismic data from 1996 to 2024. The results revealed significant seismic clustering near major fault zones, particularly around the Tabriz, Salmas, Khoy, and Makran faults. Kernel Density Estimation (KDE) identified areas with high seismic intensity, while Getis-Ord G_i^* hotspot analysis and Moran's I confirmed strong spatial clustering of events near fault lines and urban centers. Buffer and polygon-based risk assessments showed that approximately 62% of urban areas lie within 14 kilometers of high-magnitude earthquake epicenters. Additionally, more than 75% of recorded earthquakes occurred at depths less than 15 kilometers, increasing potential damage risks in densely populated cities such as Tabriz, Urmia, Sarab, and Maragheh. These findings highlight the urgent need for data-driven mitigation strategies in this seismically active region.

The study underscores the importance of applying multi-criteria decision-making (MCDM) models in GIS environments to prioritize at-risk zones and inform emergency planning. The results also support the use of predictive models such as Random Forest, ANN, and PROMETHEE- $VIKOR$, especially in data-scarce contexts. Building urban-scale spatial databases from multi-source inputs, as demonstrated in recent European studies, can further support the development of early warning and rapid response systems. Given the population exposure, structural vulnerability, and planning challenges in several cities, implementing stricter seismic codes,

monitoring active faults, and improving public education are essential. Future research should integrate geotechnical data, run earthquake scenario simulations, and explore AI-based forecasting models to improve accuracy and usability. This study offers a regionally tailored yet adaptable framework for assessing seismic vulnerability and guiding urban resilience strategies.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری

تحلیل فضایی-زمانی رخداد زمین‌لرزه با استفاده از آماره‌های فضایی در سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS، مطالعه موردی: منطقه شمال غرب ایران

رویا مقابلی^۱، معصومه راجی‌خواه^۲، علیرضا محمدی^۳

۱- گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: roya.moghabeli@gmail.com

۲- گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m.rajikhah@gmail.com

۳- (نویسنده مسئول)، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a.mohammadi@uma.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۹/۲۹

واژگان کلیدی:

آسیب‌پذیری شهری،
تحلیل فضایی-زمانی،
زمین‌لرزه،
سامانه اطلاعات
جغرافیایی (GIS)،
شمال غرب ایران.

تحلیل فضایی-زمانی زمین‌لرزه‌ها نقش مهمی در شناسایی نواحی پرخطر، اولویت‌بندی مداخلات و کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ایفا می‌کند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل خوشه‌های لرزه‌ای در منطقه شمال غرب ایران، از داده‌های بیش از ۳۵۰۰ رخداد زمین‌لرزه با بزرگای ۴ و بیشتر، در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ بهره گرفته است. این داده‌ها از مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استخراج و با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تکنیک‌هایی مانند چگالی کرنل (KDE)، شاخص خوشه‌ای Getis-Ord Gi و خودهمبستگی مکانی موران بررسی شدند. یافته‌ها نشان داد که بیشترین تراکم زمین‌لرزه‌ها در مجاورت گسل‌های فعالی چون تبریز، خوی، سلماس و مکران رخ داده و حدود ۶۲٪ شهرهای منطقه در شعاع کمتر از ۱۴ کیلومتر از این رخدادها قرار دارند. همچنین، ۷۵٪ زمین‌لرزه‌ها دارای عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر بوده‌اند که خطر تخریب شدید در بافت‌های متراکم شهری را افزایش می‌دهد. در این میان، خوشه‌های داغ در نواحی شهری پرتراکم شناسایی شده که با پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا انطباق دارند. نوآوری پژوهش در تلفیق تحلیل‌های فضا-زمانی، شاخص‌های آسیب‌پذیری چندبعدی، و مدل‌سازی منطقه‌ای با ابزارهای پیشرفته GIS است که الگویی بومی‌شده برای ارزیابی لرزه‌ای در مقیاس فراشهری ارائه می‌دهد. یافته‌ها بر لزوم اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه ساخت‌وساز، توسعه سامانه‌های هشدار سریع، پایش مداوم گسل‌ها و طراحی پایگاه‌های داده مکانی به‌روز تأکید دارد. همچنین استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، Random Forest و ANN در برنامه‌ریزی مدیریت بحران توصیه می‌شود. از جمله محدودیت‌ها، فقدان داده‌های دقیق ژئوتکنیکی در مقیاس منطقه‌ای است که در پژوهش‌های آتی قابل جبران خواهد بود.

استناد: مقابلی، رویا؛ راجی‌خواه، معصومه؛ محمدی، علیرضا. (۱۴۰۴). تحلیل فضایی-زمانی رخداد زمین‌لرزه با استفاده از آماره‌های فضایی در سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS، مطالعه موردی: منطقه شمال غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری*، ۱۳ (۴)، ۲۳-۴۱.

<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2025.393830.2058>

مقدمه

زلزله از مهم‌ترین و ویرانگرترین مخاطرات طبیعی در ایران است و شمال غرب کشور به دلیل موقعیت زمین‌ساختی، وجود گسل‌های فعال و تمرکز زیرساخت‌های انسانی و اقتصادی، از آسیب‌پذیرترین مناطق به شمار می‌رود. تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای مستلزم توجه هم‌زمان به عوامل فیزیکی، محیطی و اجتماعی اقتصادی است و تنها با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیل فضایی پیشرفته می‌توان تصویری دقیق و واقع‌بینانه از توزیع خطر در مقیاس منطقه‌ای ارائه کرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص‌های اجتماعی و جمعیتی همچون ساختار خانوار، میزان مشارکت اجتماعی و ویژگی‌های اقتصادی، در کنار متغیرهای کالبدی، نقش مؤثری در تعیین سطح تاب‌آوری مناطق شهری دارند (Meshkini & Alipour, 2024).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در سطح بین‌المللی با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تحلیل چندمعیاره، به سنجش آسیب‌پذیری لرزه‌ای در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای پرداخته‌اند. این مطالعات نشان داده‌اند که تلفیق شاخص‌های کالبدی، محیطی و انسانی با مدل‌های آماری و تحلیل مکانی، نقش مؤثری در شناسایی نقاط بحرانی و تصمیم‌سازی مدیریت بحران دارد (Sammartano et al., 2023; Doğan et al., 2025; Alizadeh et al., 2021).

در ایران، هرچند پژوهش‌های متعددی با استفاده از GIS و روش‌های تحلیل چندمعیاره به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری پرداخته‌اند، اما بیشتر آن‌ها در مقیاس محلی و با رویکردی تک‌بعدی انجام شده‌اند. به‌عنوان نمونه، در تهران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN-MLP) و تحلیل چندمعیاره، آسیب‌پذیری لرزه‌ای بلوک‌های شهری بررسی شده و نتایج حاکی از تمرکز آسیب‌پذیری در مناطق پرتراکم و مرکزی شهر بوده است (Afsari et al., 2023). در تبریز نیز، با بهره‌گیری از ترکیب مدل‌های ANN و SWOT-QSPM، چهار بعد کالبدی، محیطی، اجتماعی-اقتصادی و زیرساختی تحلیل شده و نقشه آسیب‌پذیری در پنج طبقه تولید شده است (Alizadeh et al., 2021). تحلیل آسیب‌پذیری مراکز خدمات بهداشتی در استان همدان با روش AHP و GIS نیز نشان داده است که حدود ۲۰ درصد از این مراکز در معرض آسیب‌پذیری بالایی قرار دارند (Babolhavaegi et al., 2023). در پژوهشی دیگر در استان کردستان، تحلیل چندمعیاره و داده‌های فضایی برای زون‌بندی زیرساخت‌های شهری استفاده شده و مناطق پر ریسک با دقت مکانی قابل‌قبولی شناسایی شده‌اند (Hasti et al., 2022). در مطالعات منطقه‌ای نیز تأکید شده است که زیرساخت‌های شهری جدید در برابر زلزله تاب‌آوری کافی ندارند و نیازمند تقویت‌اند (Karimi Ghotbabadi & Zangiabadi, 2023).

مطالعاتی نیز به بررسی آسیب‌پذیری در شرایط داده‌ای ناقص پرداخته‌اند. برای نمونه، در شهر تبریز با استفاده از ترکیب روش‌های AHP، مجموعه‌های فازی و TOPSIS، مدلی برای تحلیل آسیب‌پذیری فیزیکی طراحی شده که با وجود محدودیت اطلاعات، خروجی‌های قابل‌اتکایی برای برنامه‌ریزی شهری ارائه کرده است (Sadrykia et al., 2017). در شهر سنندج نیز، دو مدل MCE-LR و Fuzzy-LR برای تولید نقشه آسیب‌پذیری ترکیب شده و نتایج نشان داده‌اند که مدل MCE-LR با دقت ۰/۹۰ عملکرد بهتری دارد (Yariyan et al., 2020). در برخی پژوهش‌های نظری در سطح بین‌المللی، با بهره‌گیری از چارچوب «خودسازمان‌یافتگی بحرانی»، رفتار زمین‌لرزه‌ها در بستر شهری مدل‌سازی شده و نشان داده شده است که حتی در مدل‌های ساده شده نیز، وابستگی ساختاری و فضایی میان رخداد‌های لرزه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش خطرپذیری مناطق شهری دارد (Greco et al., 2017). در مطالعه‌ای دیگر، مدل‌های ترکیبی

مبتنی بر ANN همچون RF-ANN و SVM-ANN برای ارزیابی آسیب‌پذیری شهری استفاده شده‌اند و مدل RF-ANN بالاترین دقت را نشان داده است (Yariyan et al., 2021).

بالاین حال، در سطح منطقه شمال غرب کشور که یکی از فعال‌ترین پهنه‌های لرزه‌ای ایران به شمار می‌رود، هنوز پژوهش‌های جامع در مقیاس فراشهری و با رویکرد تلفیقی محدود هستند. مطالعات زمین‌شناسی و تحلیل خطر نیز تأکید دارند که این منطقه به دلیل شرایط ساختاری خاص، مستعد زمین‌لرزه‌های شدید بوده و ریسک بالایی دارد (Tavakoli & Ghafory-Ashtiany, 2017). با این‌که زمین‌لرزه‌های با بزرگای متوسط ($M_w \geq 4$) در این ناحیه به دفعات رخ داده‌اند، اما در ادبیات علمی، تأثیر آن‌ها در شکل‌دهی خوشه‌های خطر فضایی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بهره‌گیری هم‌زمان از روش‌های پیشرفته تحلیل خوشه‌ای مانند چگالی کرنل (KDE)، همبستگی فضایی موران (Moran's I) و شاخص خوشه‌ای داغ Gi در این سطح جغرافیایی نادر بوده و سبب شده تا درک جامعی از توزیع فضایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای حاصل نشود. نبود نقشه‌های تصمیم‌یار با دقت بالا در مقیاس منطقه‌ای، یکی از خلأهای آشکار در ادبیات ملی به شمار می‌رود. مطالعات انجام‌شده در تبریز نیز نشان داده‌اند که اگرچه تاب‌آوری کاربری‌های حیاتی شهر در برخی شاخص‌ها مناسب است، اما در معیارهایی مانند هوشمند سازی و مشارکت عمومی، ضعف قابل توجهی وجود دارد (Pourmohammadi et al., 2018). این شکاف پژوهشی، به‌ویژه در تغییر تمرکز از مقیاس محلی به منطقه‌ای و ترکیب روش‌های تحلیلی پیشرفته، هماهنگ با اهداف مقاله حاضر است و نوآوری روش‌شناختی آن را تقویت می‌کند.

این پژوهش با تمرکز بر شمال غرب ایران در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴، و با بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌ای و روش‌های تحلیل فضایی پیشرفته مانند KDE، موران و Gi، به شناسایی نواحی با آسیب‌پذیری بالای لرزه‌ای می‌پردازد. مدل فضایی-زمانی ارائه‌شده، ابعاد کالبدی، محیطی و انسانی را تلفیق کرده و چارچوبی کاربردی برای ارزیابی منطقه‌ای و تصمیم‌سازی در مدیریت بحران و سیاست‌گذاری شهری ارائه می‌شود.

مبانی نظری

زمین‌لرزه و مخاطرات مرتبط با آن

زمین‌لرزه نتیجه آزادسازی ناگهانی انرژی در گسل‌های فعال است و تحلیل ساختارهای تکتونیکی، پایه ارزیابی خطر محسوب می‌شود. مدل‌های جدید مانند NSHM 2023 با ادغام داده‌های گسل، شدت و حرکت زمین، دقت نقشه‌های خطر را افزایش داده‌اند (Petersen et al., 2024; Petersen et al., 2020). در این میان، روش KDE نیز در شناسایی پهنه‌های فعال لرزه‌ای بسیار کارآمد بوده و در مطالعه ترکیه-سوریه، چگالی بالای رخدادها را در امتداد ساختارهای تکتونیکی نشان داده است (Amador Luna et al., 2024). از سوی دیگر، کاربرد مدل‌های یادگیری عمیق مانند Earthquake Transformer که با مکانیزم‌های توجه^۱ طراحی شده‌اند، باعث شده است تا حتی زلزله‌های کوچک نیز از میان سیگنال‌های نویزی به دقت شناسایی و زمان‌بندی شوند (Mousavi et al., 2020). چنان‌که در منطقه پالو، مدل MLP نقش شاخص‌های طیفی را در تفکیک سازه‌های فروریخته مشخص کرد (Matin & Pradhan, 2021). افزون بر این، پژوهش‌های زمین‌ساختی جدید اهمیت بررسی ساختارهای گسلی و ژئومکانیک پوسته را در رفتار لرزه‌ای تأیید کرده‌اند (Wang & Chen, 2019). در این مقاله، با تمرکز بر منطقه شمال غرب ایران، از تکنیک‌هایی چون KDE و تحلیل همبستگی فضایی برای تحلیل الگوهای لرزه‌ای استفاده شده است. تلفیق این رویکرد با مدل‌های نوین و داده‌های

به‌روز، پاسخ به شکاف‌های علمی در مقیاس منطقه‌ای را هدف قرار می‌دهد.

زمین‌لرزه و پیامدهای فضایی-زمانی آن

زمین‌لرزه‌ها تحت تأثیر ساختارهای زمین‌ساختی، نوع گسل و الگوهای فضا-زمانی رخ می‌دهند و ارزیابی آن‌ها نیازمند روش‌های تحلیلی پیشرفته است. شاخص‌هایی مانند برآورد چگالی کرنل (KDE)، Moran's I و Gi در شناسایی خوشه‌های لرزه‌ای و نواحی پر ریسک بسیار مؤثرند (Cesca, 2020; Zhang et al., 2022; Kwon et al., 2023). خوشه‌بندی تراکمی نیز در قفقاز جنوبی الگوهای لرزه‌ای ۲۰۱۰-۲۰۲۳ را به‌خوبی تفکیک کرده است (Skurativskiy et al., 2025) و در ژاپن، کاهش b-value با الگوریتم‌های single-link برای شناسایی نواحی مستعد زلزله‌های بزرگ به‌کاررفته است (Yamagishi et al., 2021). مدل‌های فرآیند خود تحریکی Hawkes با لحاظ ناهمگنی فضایی و تعاملات پیچیده زمان-مکان در پس‌لرزه‌ها، دقت مدل‌سازی را ارتقاء داده‌اند (Kwon et al., 2023) و ابزار Seiscloud نیز با خوشه‌بندی متراکم، تحلیل داده‌های لرزه‌ای را تسهیل کرده است (Cesca, 2020). همچنین بررسی آتش‌فشان ۲۰۱۸ کیلاوا نشان داد که تحلیل تغییرات زمانی-مکانی سرعت موج، ابزار مؤثری برای شناسایی مراحل شکست است (Hotovec-Ellis et al., 2022). این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های مکانی، زمانی و لرزه‌ای با ابزارهای پیشرفته آماری و GIS، بنیانی قوی برای ارزیابی خطر در مناطق لرزه‌خیز مانند شمال غرب ایران فراهم می‌کند.

آسیب‌پذیری فضایی-کالبدی و اجتماعی-اقتصادی

آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری نتیجه برهم‌کنش شاخص‌های کالبدی و اجتماعی-اقتصادی است مانند کیفیت سازه، تراکم، قدمت بافت، وضعیت معابر، درآمد و دسترسی به خدمات نقش کلیدی دارند. به‌گونه‌ای که مناطق با زیرساخت فرسوده و ساختمان‌های غیر مقاوم بیشترین آسیب‌پذیری را دارند (Fayaz et al., 2023; Sauti et al., 2021). مدل‌سازی آسیب‌پذیری در محیط GIS با روش‌های چندمعیاره مانند AHP، TOPSIS و PROMETHEE-VIKOR امکان تلفیق شاخص‌ها و تولید نقشه‌های دقیق را فراهم می‌سازد (Alemdar, 2025; Zhang et al., 2022). ارزیابی لرزه‌ای محیط شهری سرینگر، تلفیق معیارهای کالبدی و اجتماعی پهنه‌های پرخطر را مشخص کرده است (Fayaz et al., 2023). همچنین، و در ایالت پاهانگ مالزی، ترکیب شاخص‌های ظرفیت، تاب‌آوری و مواجهه، اولویت‌بندی مؤثر مداخلات را ممکن ساخت (Sauti et al., 2021). مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی نیز شناسایی نواحی پر ریسک را حتی در نبود داده میدانی گسترده ممکن کرده‌اند (Afsari et al., 2023; Yariyan et al., 2021). در ترکیه، تحلیل ۱۵ شاخص لرزه‌ای زیرساخت حمل‌ونقل نشان داد بخش بزرگی از شبکه‌های شریانی استانبول در نواحی پراسیب‌پذیر قرار دارند (Alemdar, 2025). در نهایت، شناسایی خوشه‌های مکانی-زمانی تلفات در زمین‌لرزه لودیان چین از طریق تحلیل‌های موران و Gi، نقش کلیدی ساختار کالبدی در تمرکز خطر را آشکار ساخت (Zhang et al., 2022). این مطالعات بر ضرورت تلفیق تحلیل فضایی و شاخص‌های کالبدی-اجتماعی تأکید دارند؛ رویکردی که در این پژوهش برای شهرهای شمال غرب ایران به‌کاررفته است.

شاخص‌های آسیب‌پذیری لرزه‌ای در محیط GIS

سامانه اطلاعات ابزاری کلیدی در تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهری است و با تلفیق شاخص‌های کالبدی، اجتماعی و ساختاری، نقشه‌های دقیق مخاطره را تولید می‌کند. در سرینگر، ترکیب معیارهای کالبدی و اجتماعی با روش‌های AHP و TOPSIS، پهنه‌های با آسیب‌پذیری بسیار بالا را آشکار ساخت (Fayaz et al., 2023). همچنین در مالزی، مدلی

مبتنی بر Exposure, Resilience و Capacity با GIS اجرا شد که در تحلیل جامع آسیب‌پذیری لرزه‌ای نواحی در پاهانگ مؤثر بود (Sauti et al., 2021). برای تحلیل شبکه‌های زیرساخت شهری، مطالعه‌ای در استان‌بول با استفاده از MCDM PROMETHEE و VIKOR و GIS نشان داد که حدود ۲۰٪ از راه‌های شهری در نواحی با آسیب‌پذیری بالا قرار دارند (Alemdar, 2025). پژوهش‌های دیگر با تلفیق ANN یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مانند شبکه عصبی مصنوعی در تهران و مدل‌های هیبریدی در سنجند، نشان دادند که دقت نقشه آسیب‌پذیری افزایش چشمگیری پیدا می‌کند (Afsari et al., 2023; Yariyan et al., 2021). افزون بر این، رویکرد استفاده از داده‌های چند منبعی برای ایجاد پایگاه مکانی ساختمان‌ها در ایتالیا، امکان ارزیابی سریع و کم‌هزینه آسیب‌پذیری شهری را فراهم کرده است (Leggieri et al., 2022). این رویکردها می‌توانند برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری مناطق شهری شمال غرب ایران به کار روند.

در این پژوهش، چارچوب نظری با اتکا به مفاهیم زلزله، تحلیل‌های فضا-زمانی، شاخص‌های کالبدی-اجتماعی و قابلیت‌های GIS در تلفیق داده‌های چند منبعی، چارچوبی منسجم برای طراحی روش‌شناسی تحقیق فراهم کرده‌اند. روش پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل‌های KDE، خوشه‌بندی فضایی-زمانی، و شاخص‌های موران و Gi است و با تکیه بر همین ادبیات نظری، به تلفیق داده‌های ساختاری و لرزه‌ای برای اولویت‌بندی نواحی پرخطر می‌پردازد. این رویکرد، مبنای تئوریک و راهنمای انتخاب متغیرها و تکنیک‌های تحلیلی پژوهش محسوب می‌شود.

روش پژوهش

روش تحقیق این پژوهش از نوع کمی و مبتنی بر رویکرد توصیفی-تحلیلی است و هدف آن تحلیل فضایی توزیع زمین‌لرزه‌ها و ارزیابی آسیب‌پذیری شهرهای شمال غرب ایران از نظر نزدیکی به خوشه‌های لرزه‌ای است. داده‌های زمین‌لرزه شامل تمام رویدادهایی با بزرگی ۴ ریشتر و بالاتر در بازه زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۴ هستند که از سامانه داده‌پردازی مرکز لرزه‌نگاری کشوری، وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استخراج شده‌اند. بازه زمانی مذکور دوره‌ای مناسب برای تحلیل الگوهای لرزه‌ای اخیر در منطقه مورد مطالعه فراهم کرده است. زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۴ ریشتر و بیشتر به دلیل توان ایجاد خسارات سازه‌ای و زیرساختی، در تحلیل‌های لرزه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارند. این رویدادها شاخصی برای پایش تنش گسل‌ها و پیش‌نشانگر زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر محسوب می‌شوند و داده‌های آن‌ها در بازبینی آیین‌نامه‌های ساختمانی و سامانه‌های هشدار سریع به کار می‌رود. همچنین، به دلیل احساس شدن توسط مردم، در ارتقای آگاهی و آمادگی عمومی مؤثرند (Han & Choi, 2008; Allen & Melgar, 2019; USGS, 2023).

در گام نخست، داده‌های زمین‌لرزه به صورت فایل CSV استخراج و در محیط ArcGIS با استفاده از ابزار XY Table to Point به فایل شیپ تبدیل شدند. مرزهای شهری، شبکه معابر و سایر لایه‌های پایه از منابع رسمی گردآوری و به پروژه اضافه شدند. برای شناسایی تراکم مکانی رخدادهای لرزه‌ای از روش تخمین تراکم کرنل^۱ استفاده شد. در این تحلیل، پهنای باند^۲ برابر با ۱۰ کیلومتر و رزولوشن شبکه تحلیلی برابر با ۱ کیلومتر تعیین شد تا خوشه‌های پرخطر با دقت مناسب در مقیاس منطقه‌ای شناسایی شوند. در تنظیمات تحلیل تراکم کرنل، از روش Planar برای محاسبه فواصل استفاده شده و مقیاس نقشه‌ها متریک (۱:۲,۰۰۰,۰۰۰) در نظر گرفته شده است. اندازه واحد تحلیل (سلول‌ها در خروجی رستر) برابر با ۱۰۰ متر تعیین گردید و واحد متریک خروجی به صورت کیلومتر مربع تعریف شد. همچنین، خروجی نقشه‌ها

1. Kernel Density Estimation

2. bandwidth

به صورت رستر با فرمت GRID تهیه شده است. در کلیه تحلیل‌های فضایی، سیستم مختصات WGS_1984_UTM_Zone_39N اعمال شده تا دقت مکانی تحلیل‌ها حفظ شود.

در ادامه، به منظور تحلیل آماری خوشه‌های معنادار فضایی، از روش Getis-Ord Gi* استفاده شد. در اجرای این تحلیل، از روش K_NEAREST_NEIGHBORS برای مفهوم‌سازی روابط فضایی بهره گرفته شد. برای محاسبه فاصله‌ها از سیستم مختصات UTM و واحد متریک با روش فاصله اقلیدسی استفاده شد. همچنین از روش ROW برای استانداردسازی وزن‌های مکانی استفاده شده و تعداد ۸ همسایه برای تعریف روابط فضایی در نظر گرفته شد. در تحلیل‌های خوشه-ناخوشه^۱، عدد ۴۹۹ به عنوان تعداد جایگشت‌ها برای آزمون‌های آماری تنظیم گردید. این تنظیمات با هدف افزایش دقت، تکرارپذیری و شفافیت نتایج تحلیل‌های فضایی انتخاب شده‌اند.

برای بررسی میزان آسیب‌پذیری شهرها، از تحلیل فاصله مکانی میان شهرها و خوشه‌های لرزه‌ای استفاده شد. در این مرحله، با بهره‌گیری از ابزار تحلیل حریم^۲ در محیط GIS، سه محدوده با شعاع‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر پیرامون خوشه‌های لرزه‌ای پرخطر ترسیم شد. سپس شهرها بر اساس موقعیت آن‌ها نسبت به این حریم‌ها طبقه‌بندی شدند. هدف از این طبقه‌بندی، ایجاد نمایه‌ای از شدت مخاطره‌پذیری لرزه‌ای بر اساس فاصله فیزیکی از منابع خطر است. تحلیل نهایی آسیب‌پذیری با تلفیق نتایج به دست آمده از روش‌های KDE، Gi* و تحلیل فاصله انجام شد تا برآورد دقیق‌تری از میزان خطرپذیری مناطق شهری ارائه گردد. همچنین، به منظور افزایش دقت تحلیل، از نتایج روش لکه‌های داغ^۳ مبتنی بر شاخص Getis-Ord Gi* نیز استفاده شد تا مناطقی با تمرکز آماری بالای زمین‌لرزه‌های شدید (خوشه‌های High-High) به طور دقیق شناسایی شوند.

با توجه به مقیاس منطقه‌ای، ورود به سطوح خرد مانند محله یا بلوک در این پژوهش مدنظر نبوده و هدف اصلی، ارائه مدلی کلان‌مقیاس برای شناسایی مناطق پرخطر و اولویت‌بندی مداخلات مدیریت بحران در شمال غرب کشور است. با این حال، چارچوب تحلیلی قابلیت توسعه به سطوح محلی را دارد و خروجی‌های مکانی پژوهش، مبنایی برای برنامه‌ریزی کلان و سامانه‌های هشدار سریع فراهم می‌کند.

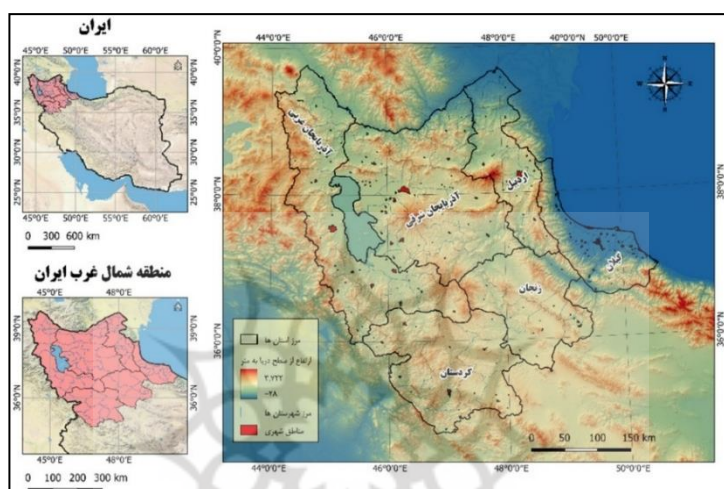
نتایج همچنین تحت تأثیر محدودیت‌های داده‌های لرزه‌ای قرار دارند؛ دقت مختصات کانونی، به‌ویژه برای رویدادهای تاریخی یا کوچک، به دلیل پراکندگی نامتوازن ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با خطا همراه است. احتمال نقص در ثبت کامل زمین‌لرزه‌های کوچک نیز وجود دارد. علاوه بر این، روش‌های فضایی-زمانی مبتنی بر KDE و GIS نسبت به تراکم داده و خطاهای مکانی حساس‌اند و ممکن است بر تفسیر الگوهای لرزه‌خیزی اثر بگذارند. با وجود این، از طریق فیلترهای آماری و کنترل کیفیت، تلاش شده اثر این محدودیت‌ها به حداقل برسد.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، منطقه شمال غرب ایران است که شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، کردستان و بخش‌هایی از استان گیلان می‌شود. این ناحیه در بازه مختصاتی ۳۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۵۰ درجه طول شرقی واقع شده و مساحتی در حدود ۱۷۰'۰۰۰ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. بر اساس سرشماری رسمی سال ۱۴۰۰، جمعیت این منطقه حدود ۱۵/۸ میلیون نفر است که ۶۷ درصد آن در مناطق شهری

1. Cluster-Outlier
2. Buffer Analysis
3. Hot Spot Analysis

سکونت دارند. همچنین طبق آمار رسمی سال ۱۴۰۱، تعداد ۲۲۷ شهر در این منطقه به ثبت رسیده است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۱). منطقه شمال غرب ایران در پهنه‌های فعال زاگرس شمالی و البرز غربی قرار دارد و گسل‌های اصلی آن مانند تبریز، زرينه‌رود، میانه-اردبیل و مکران سابقه زمین‌لرزه‌های شدید دارند. پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی و توپوگرافی متنوع، همراه با تکتونیسم فعال، از عوامل اصلی تمرکز لرزه‌خیزی در این ناحیه محسوب می‌شوند (Meharpooyan et al., 2016). در این ناحیه، گسل شمال تبریز یکی از فعال‌ترین و خطرناک‌ترین گسل‌های کشور است که با سازوکار امتدادلغز راست‌بر، دارای نرخ لغزش میانگین بین ۷ تا ۹ میلی‌متر در سال است. مطالعات متعدد از جمله بررسی‌های GPS، تحلیل داده‌های InSAR و شواهد مورفوتکتونیکی نرخ‌هایی در بازه ۷/۳ تا ۸/۷ میلی‌متر در سال برای این گسل گزارش کرده‌اند (Rizza et al., 2013; Karimzadeh et al., 2013; Azad et al., 2015).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه شمال غرب ایران در کشور و تقسیمات اداری

یافته‌ها

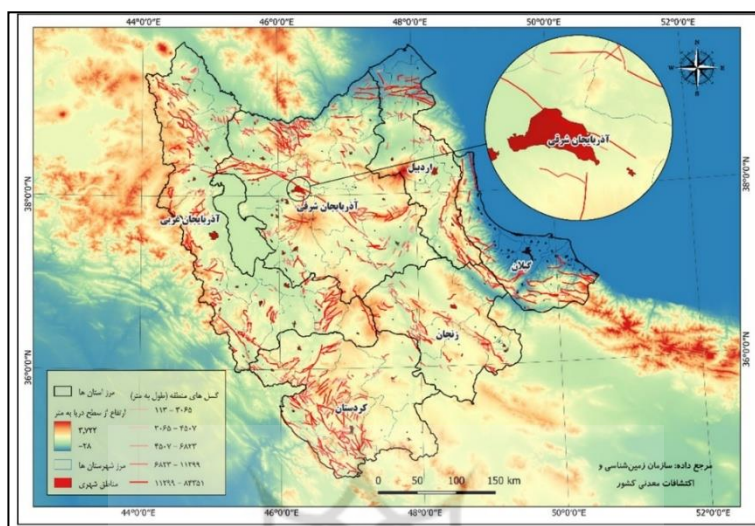
الف) الگوی توزیع گسل‌های فعال و تأثیر آن بر مخاطرات لرزه‌ای در منطقه شمال غرب ایران

نقشه ارائه‌شده در شکل ۲، توزیع گسل‌های فعال در منطقه شمال غرب ایران اطلاعاتی درباره ساختارهای زمین‌ساختی و مخاطرات لرزه‌ای این منطقه ارائه می‌کند. گسل‌های مشخص‌شده در نقشه با رنگ قرمز نمایش داده‌شده‌اند و بر اساس طول به پنج دسته تقسیم می‌شوند. این گسل‌ها در استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، کردستان و گیلان پراکنده‌اند و الگوی توزیع آن‌ها ارتباط نزدیکی با ارتفاعات و توپوگرافی منطقه دارد.

بر اساس اطلاعات نقشه ۲، طول گسل‌های این منطقه در بازه‌های ۱۱۲ تا ۲۶۵ متر، ۲۶۵ تا ۰۵۷ متر، ۰۵۷ تا ۵، ۸۳۳ متر، ۵ تا ۸۳۳ متر، ۱۱ تا ۳۹۹ متر و بیش از ۱۱، ۳۹۹ متر قرار دارد. گسل‌های بلندتر عمدتاً در امتداد زاگرس شمالی و البرز غربی متمرکزند؛ الگویی که نشان‌دهنده تراکم بیشتر گسل و فعالیت تکتونیکی و لرزه‌خیزی بالاتر در نواحی مرتفع است.

ارتفاع منطقه از ۲۷۲۲ متر در کوهستان تا ۲۸ متر زیر سطح دریا در دشت‌ها متغیر است. تراکم گسل‌ها در ارتفاعات زاگرس شمالی و البرز غربی بیشتر و در نواحی پست کمتر است، که تأثیر زمین‌ساخت بر الگوی گسل‌ها را نشان می‌دهد. شهرهای تبریز، ارومیه، زنجان و سنندج در مجاورت این ساختارها و گسل‌های ساحلی خزر در گیلان، خطر زمین‌لرزه‌های آینده را نمایان می‌کنند. شمال غرب ایران از نظر زمین‌ساختی دارای گسل‌های فعال متعددی است؛ مهم‌ترین آن‌ها گسل

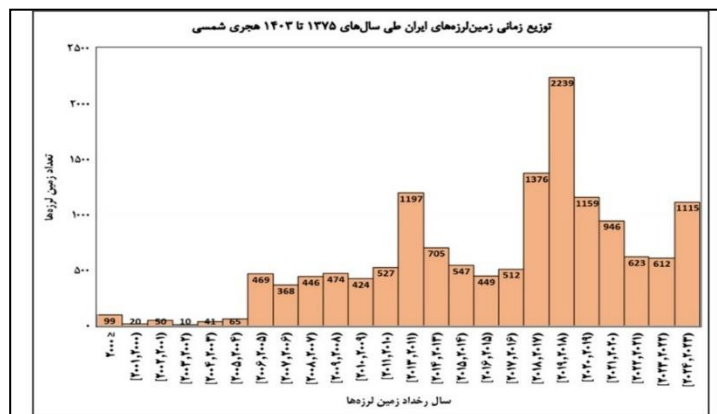
شمال تبریز است که با زمین‌لرزه‌های تاریخی ۱۱۵۸ و ۱۳۹۱ هجری شمسی شناخته می‌شود (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۵). گسل‌های سلماس، سرو، پیرانشهر و زرینه‌رود نیز با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا شناسایی شده‌اند (Talebian & Jackson, 2004). تمرکز این گسل‌ها در زاگرس شمالی و البرز غربی بیانگر نقش فعالیت تکتونیکی در ساختار لرزه‌ای منطقه است.



شکل ۲. نقشه توزیع گسل‌های فعال در منطقه شمال غرب ایران و ارتباط آن با عوارض توپوگرافی

ب) توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی

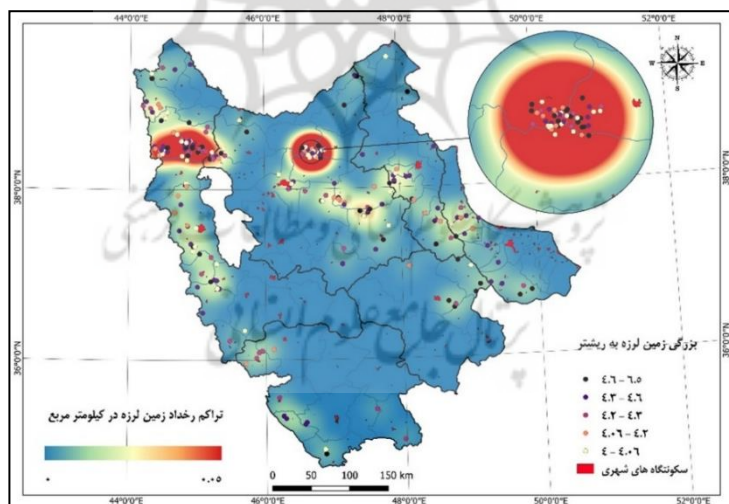
تحلیل داده‌های لرزه‌ای در بازه ۲۹ ساله (۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳) نشان می‌دهد که میانگین تعداد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در این دوره حدود ۴۹۹ رخداد در سال بوده است. حداقل سالانه ۱۰ رویداد و حداکثر ۲۲۳۹ رویداد در یک سال ثبت‌شده است (شکل ۳). بررسی روند زمانی نشان می‌دهد که بازه ابتدایی (۱۳۷۵-۱۳۷۸) کمترین تعداد زلزله‌های ثبت‌شده (حدود ۱۰۰ رخداد) و بازه اخیر (۱۳۹۹-۱۴۰۲) بیشترین مقدار (نزدیک به ۶۰۰ رخداد) را داشته است. این اختلاف قابل توجه، احتمالاً ناشی از ترکیبی از افزایش فعالیت‌های تکتونیکی و توسعه زیرساخت‌های لرزه‌نگاری در کشور بوده است. میانگین سالانه در دهه ۱۳۷۵-۱۳۸۵ حدود ۲۰۰ رخداد، و در سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۰۳ به بیش از ۴۵۰ رویداد افزایش یافته است. نوسانات بین دوره‌ای نیز قابل مشاهده است؛ به عنوان نمونه، بازه ۱۳۸۸-۱۳۹۱ با ثبت ۵۵۰ رویداد، رشد قابل توجهی نسبت به میانگین دهه قبل دارد، درحالی که دوره ۱۳۷۹-۱۳۸۲ با ۱۵۰ رویداد کاهش محسوسی را نشان می‌دهد. دلایل احتمالی نوسانات شامل پیشرفت فناوری ثبت زمین‌لرزه، افزایش تراکم ایستگاه‌ها و تغییرات دوره‌ای تکتونیکی است. روند کلی نشان‌دهنده افزایش پایش و دقت ثبت لرزه‌ها در دهه‌های اخیر هم‌سو با توسعه شبکه‌های ملی است.



شکل ۳. توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های شمال غرب ایران طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ هجری شمسی (منبع: پایگاه داده‌های لرزه‌نگاری ایران)

تحلیل تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها (تحلیل تراکم کرنل)

نقشه شکل ۴، الگوی تراکم مکانی زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۴ و بیشتر، شمال غرب ایران با روش تخمین تراکم کرنل (KDE)^۱ نمایش می‌دهد. نقاط با تمرکز بالا با رنگ‌های گرم‌تر (قرمز و نارنجی) و مناطق کم تراکم با رنگ‌های سردتر (آبی) مشخص شده‌اند. پهنای باند (Bandwidth) ۱۰ کیلومتر و رزولوشن شبکه ۱ کیلومتر انتخاب شده تا دقت و وضوح تحلیل در مقیاس منطقه‌ای حفظ شود. دو کانون اصلی لرزه‌ای در شمال غرب آذربایجان شرقی (تبریز-ورزقان) و غرب آذربایجان غربی (سلماس-خوی) شناسایی شدند. هم‌پوشانی با گسل‌های تبریز، زرينه‌رود و سلماس نشان‌دهنده ارتباط مستقیم زمین‌ساخت با تمرکز رخدادهاست. نرخ وقوع زلزله در نقاط پرتراکم بیش از ۰/۵ و در نواحی کم‌فعال کمتر از ۰/۰۵ رخداد در هر کیلومترمربع است؛ اختلافی بیش از ده برابر که مبنای شناسایی مناطق بحرانی است.

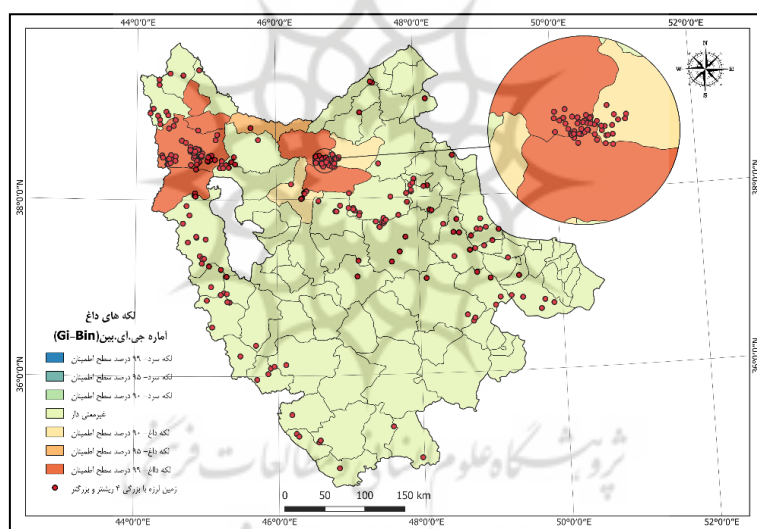


شکل ۴. نقشه توزیع تراکم فضایی زمین‌لرزه‌ها در شمال غرب ایران بر اساس روش کرنل تراکم

تحلیل لکه‌های داغ- سرد: آماره Gi Getis-Ord

در این مرحله، به‌منظور شناسایی الگوی فضایی خوشه‌های معنادار زمین‌لرزه، از آماره Gi استفاده شد. این تحلیل در محیط ArcGIS و با بهره‌گیری از ابزار Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi) انجام گردید. داده‌های زمین‌لرزه با

بزرگی ۴ و بیشتر وارد نرم‌افزار شده و مفهوم‌سازی فضایی با مدل K-Nearest Neighbors انجام شد. در این مدل، فاصله بین همسایگی‌ها بر اساس سیستم مختصات UTM (واحد متر) و با روش فاصله اقلیدسی محاسبه شد. تعداد همسایگان ۸ تعریف گردید و وزن فضایی با روش ROW استاندارد شد. همچنین، تعداد جایگشت‌ها در آزمون Monte Carlo برابر ۴۹۹ قرار داده شد تا نتایج تحلیل از دقت آماری بالایی برخوردار باشند (شکل ۵). خروجی تحلیل شامل نقشه رستری، جداول توصیفی و مقادیر Z-score و P-value برای هر سلول تحلیلی است. مقادیر مثبت و بزرگ Z همراه با P-value کمتر از ۰.۰۱ نشان‌دهنده خوشه‌های داغ^۱ و مقادیر منفی Z نشان‌دهنده لکه‌های سرد^۲ هستند. نتایج نشان می‌دهد که لکه‌های داغ (رنگ‌های قرمز و نارنجی با سطح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪) عمدتاً در نواحی پیرامون تبریز، سلماس، خوی، اردبیل، ورزقان، و جنوب آذربایجان غربی تمرکز دارند. این نواحی در مجاورت گسل‌های فعال بوده و دارای فراوانی بالای رویدادهای لرزه‌ای هستند. در مقابل، لکه‌های سرد (رنگ‌های آبی با سطح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪) در بخش‌هایی از شرق زنجان، شمال شرق کردستان، و جنوب استان اردبیل ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده پراکندگی کم و نظم فضایی پایین‌تر در توزیع زلزله‌هاست. تحلیل آماری اطلاعات توصیفی نشان می‌دهد که بیش از ۶۰٪ زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در محدوده لکه‌های داغ قرار گرفته‌اند. این امر بیانگر تمرکز بالا و توزیع غیر تصادفی رخدادهای لرزه‌ای در بخشی از منطقه شمال غرب کشور است، که نقش مهمی در ارزیابی خطرات لرزه‌ای ایفا می‌کند.



شکل ۵. نقشه لکه‌های داغ و سرد زمین‌لرزه‌ها در شمال غرب ایران

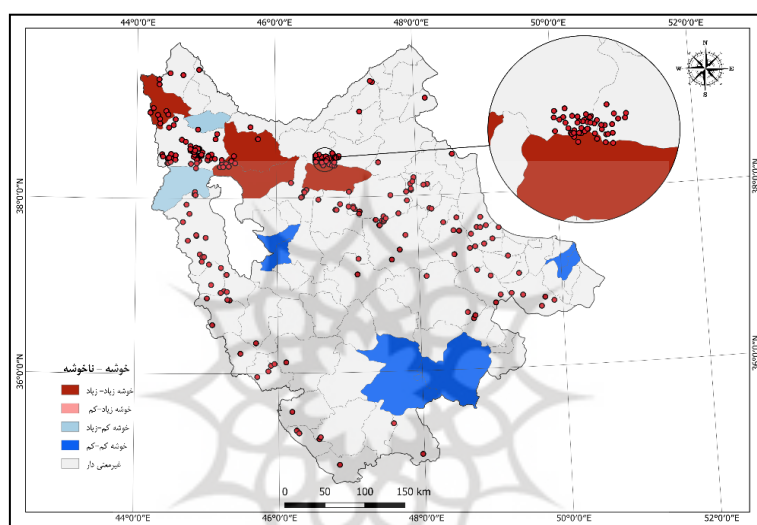
الگوی فضایی زمین‌لرزه‌ها با روش خوشه-ناخوشه: تحلیل موران محلی انسلین^۳

در این بخش، از تحلیل موران محلی^۴ برای بررسی خودهمبستگی فضایی رخدادهای زمین‌لرزه استفاده شد. این روش خوشه‌های معنادار از نظر آماری را شناسایی کرده و آن‌ها را به چهار دسته تقسیم می‌کند: HH (مقدار زیاد با همسایگان زیاد)، LL (مقدار کم با همسایگان کم)، HL (مقدار زیاد در همسایگی کم)، و LH (مقدار کم در همسایگی زیاد). این دسته‌ها الگوی ناهنجاری فضایی را آشکار می‌کنند (شکل ۶).

مفهوم‌سازی روابط فضایی با استفاده از روش K-Nearest Neighbors انجام شده است که در آن تعداد همسایگان ۸

1. Hot Spots
2. Cold Spots
3. Anselin's Local Moran's I
4. Local Moran's I

تعریف گردید. فاصله‌ها بر اساس سیستم مختصات UTM و واحد متر محاسبه شده‌اند، نوع وزن دهی ROW تحلیل شد. این مدل با در نظر گرفتن همسایگی نزدیک به صورت استاندارد، امکان شناسایی دقیق‌تری از خوشه‌ها فراهم می‌کند. نقشه شکل ۶ نشان می‌دهد، خوشه‌های HH عمدتاً در شمال غرب آذربایجان شرقی، جنوب اردبیل و غرب آذربایجان غربی متمرکز هستند. این مناطق نشان‌دهنده تمرکز بالا و پراکنش منظم زمین‌لرزه‌ها در کنار یکدیگرند. در مقابل، مناطق مرکزی و جنوبی زنجان، کردستان و شرق گیلان بیشتر در دسته LL قرار دارند که نشان‌دهنده پراکندگی کم و خوشه‌های ضعیف‌تر است. بر اساس اطلاعات توصیفی، بیش از ۶۵٪ از زمین‌لرزه‌ها در خوشه‌های HH ثبت شده‌اند، که نشان‌دهنده تجمع فضایی بالا در نواحی خاصی از منطقه مورد مطالعه است. نقاط HL و LH در جنوب اردبیل، قروه، و شرق زنجان مشاهده شده‌اند که از الگوی غالب تبعیت نمی‌کنند و احتمالاً ناشی از ناهنجاری‌های زمین‌ساختی یا محدودیت‌های داده‌ای باشند.

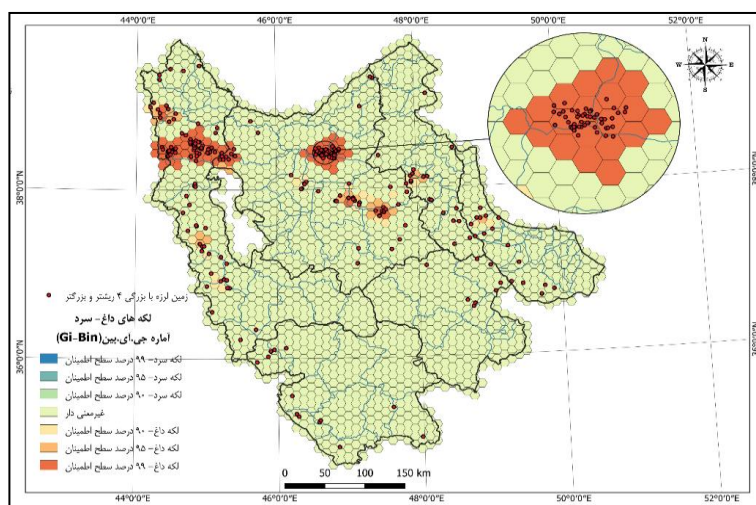


شکل ۶. نقشه خوشه-ناخوشه زمین‌لرزه‌های شمال غرب ایران (تحلیل موران محلی انسلین)

تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم برای شناسایی کانون‌های پرخطر زمین‌لرزه در شمال غرب ایران نقشه ۷، توزیع خطر زمین‌لرزه در شمال غرب ایران را با تحلیل لکه‌های داغ Gi-Bin و چندضلعی‌های فضایی منظم^۱ با اندازه سلول‌های ۱۰×۱۰ کیلومتر (معادل ۱۰۰ کیلومترمربع) نمایش می‌دهد. نقاط قرمز در نقشه نشان‌دهنده موقعیت زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴ و بیشتر هستند که به صورت طبقه‌بندی شده درون واحدهای فضایی قرار گرفته‌اند. در این مدل، از آماره G_i^* در قالب مدل Gi-Bin، سلول‌های فضایی، بر اساس سطح معناداری آماری به پنج کلاس تقسیم شدند: از سطح اطمینان ۹۹٪ (داغ‌ترین نقاط) تا ناحیه فاقد الگوی معنادار. کل شمال غرب ایران به ۱۸۲۵ واحد فضایی ۱۰۰ کیلومترمربعی تقسیم شد، که ۲۶۷ واحد (۱۴/۶٪) به عنوان لکه‌های داغ با اطمینان ۹۰٪ و بالاتر شناسایی شدند. از این میان: ۹۲ واحد (۵/۰۴٪) دارای اطمینان ۹۹٪، ۸۸ واحد (۴/۸٪) در سطح ۹۵٪، و ۸۷ واحد (۴/۷۶٪) در سطح ۹۰٪ بودند. در مقابل، ۴۱ واحد (۲/۲۵٪) لکه‌های سرد با اطمینان ۹۰٪ یا بیشتر و ۵۱۷ واحد (۲۸/۱٪) فاقد الگوی معنادار بوده‌اند.

پرتراکم‌ترین واحد داغ بیش از ۸۵ رخداد ثبت کرده و میانگین زمین‌لرزه در لکه‌های داغ ۴۱.۲ رخداد در هر واحد است،

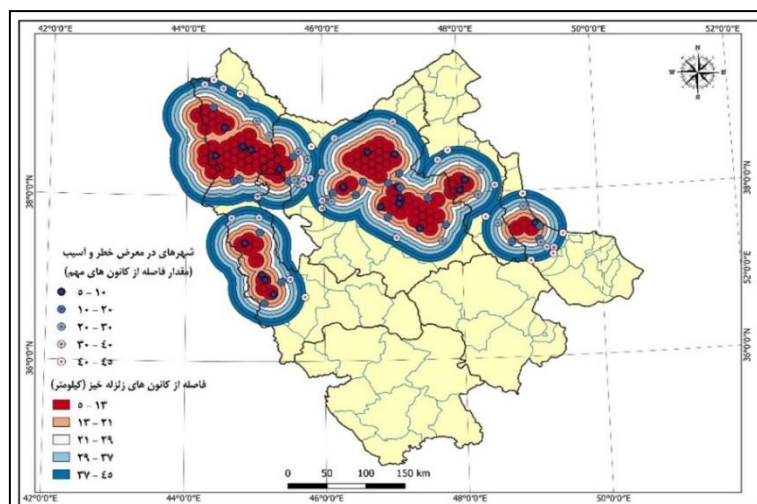
یعنی ۲۲ برابر میانگین منطقه‌ای (۱۸.۷ رخداد). بیشترین خطر لرزه‌ای مربوط به واحدهای غرب و مرکز منطقه، به‌ویژه با اطمینان ۹۹٪، است که کانون اصلی خوشه‌های شدید زلزله شمال غرب ایران محسوب می‌شوند.



شکل ۷. توزیع شهرهای در معرض خطر زمین‌لرزه بر اساس تحلیل لکه‌های داغ و چندضلعی‌های منظم در شمال غرب ایران

شناسایی شهرهای در معرض آسیب از نظر رخداد زمین‌لرزه

شکل ۸، الگوی مکانی شهرهای در معرض خطر زمین‌لرزه در منطقه شمال غرب ایران را با ترکیب تحلیل لکه‌های داغ و مدل‌سازی حریم مکانی^۱ نمایش می‌دهد. در این تحلیل، فاصله فیزیکی مراکز شهری از کانون‌های زمین‌لرزه با استفاده از حلقه‌های متحدالمرکز در فواصل ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ کیلومتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. شهرهای نزدیک به کانون‌ها با رنگ قرمز و مناطق دورتر با رنگ‌های سردتر نمایش داده شده‌اند. تحلیل Spatial Join میان لایه شهرها و حریم‌های فاصله‌ای نشان داد، از مجموع ۸۴ شهر در شعاع ۴۵ کیلومتری خوشه‌های لرزه‌ای، ۲۴ شهر (۲۸/۵٪) کمتر از ۱۰ کیلومتر، ۳۲ شهر (۳۸٪) در ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر، ۱۸ شهر (۲۱/۴٪) در ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر، و ۱۰ شهر (۱۲٪) در ۳۰ تا ۴۵ کیلومتر از کانون‌های لرزه‌ای قرار دارند. در مجموع، ۸۴ شهر در شعاع ۴۵ کیلومتری خوشه‌های لرزه‌ای شناسایی شده‌اند. شهرهایی مانند تبریز، ورزقان، اهر، سلماس و خوی در دسته شهرهای با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر از کانون‌های پرخطر قرار دارند. شهرهای مشکین‌شهر، ماکو، و مهاباد نیز در فاصله ۴۰ تا ۴۵ کیلومتری بوده و در گروه با خطر نسبتاً زیاد طبقه‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی مبتنی بر منطق فضایی است و با نتایج تحلیل‌های KDE و Gi^* نیز هم‌راستاست.



شکل ۸. شهرهای در معرض آسیب لرزه‌ای، بر اساس تحلیل لکه‌های داغ و محدوده‌های حریم خطر

بررسی اولویت‌بندی شهرهای در معرض خطر زمین‌لرزه

تحلیل داده‌های ترکیبی شهری و لرزه‌ای (جدول ۱) نشان می‌دهد که سیه‌چشمه، رضوانشهر، کشکسرای و بخشایش در فاصله کمتر از ۱۵ کیلومتر از خوشه‌های لرزه‌ای قرار دارند و در گروه شهرهای با خطرپذیری بالا طبقه‌بندی شده‌اند. در مقابل، هشت‌رود، اردبیل، خلخال و مرند در فاصله ۳۵ تا ۴۵ کیلومتر بوده و در دسته شهرهای با خطر نسبتاً زیاد یا زیاد قرار می‌گیرند. تراکم شهرهای آسیب‌پذیر عمدتاً در استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل و مجاورت گسل‌های فعال، به‌ویژه گسل تبریز، مشاهده می‌شود. نتایج فاصله مکانی نشان می‌دهد که شهرهای در شعاع کمتر از ۲۰ کیلومتر بیشترین خطرپذیری را دارند و شهرهای ۳۰-۴۵ کیلومتری نیز آسیب‌پذیر محسوب می‌شوند. دسته‌بندی‌ها بر اساس گام‌های ۱۰ کیلومتری و منطق تحلیلی GIS انجام شده و با وجود نبود استاندارد رسمی منطقه‌ای، چارچوبی عملی برای شناسایی و اولویت‌بندی شهرهای پرخطر ارائه می‌کند.

جدول ۱. شهرهای شمال غرب ایران در معرض خطر زمین‌لرزه بر اساس فاصله از کانون‌های لرزه‌ای

میزان آسیب‌پذیری	فاصله به کیلومتر	اسم شهر	میزان آسیب‌پذیری	فاصله به کیلومتر	اسم شهر	میزان آسیب‌پذیری	فاصله به کیلومتر	اسم شهر
زیاد	۱۵	سیه چشمه	زیاد	۳۵	هشت‌رود	نسبتاً زیاد	۴۵	لاهرود
زیاد	۱۵	رضوانشهر	زیاد	۳۰	اردبیل	نسبتاً زیاد	۴۵	گیوی
زیاد	۱۵	کشکسرای	زیاد	۳۰	خلخال	نسبتاً زیاد	۴۵	بازرگان
زیاد	۱۵	بخشایش	زیاد	۳۰	مرند	نسبتاً زیاد	۴۵	شوط
زیاد	۱۵	سردرود	زیاد	۳۰	خامنه	نسبتاً زیاد	۴۵	مهاباد
زیاد	۱۵	مهربان	زیاد	۳۰	شندآباد	نسبتاً زیاد	۴۵	لیسار
زیاد	۱۵	سراب	زیاد	۳۰	خسرشهر	نسبتاً زیاد	۴۵	بندرانزلی
زیاد	۱۵	تیکمه داش	زیاد	۲۵	ضیال‌الدین	نسبتاً زیاد	۴۵	فومن
خیلی زیاد	۱۰	سرعین	زیاد	۲۵	ایواوغلی	نسبتاً زیاد	۴۵	ماسوله
خیلی زیاد	۱۰	اشنویه	زیاد	۲۵	هشتپر	نسبتاً زیاد	۴۵	زنوز
خیلی زیاد	۱۰	پره سر	زیاد	۲۵	ماسال	نسبتاً زیاد	۴۰	مشگین شهر
خیلی زیاد	۱۰	اهر	زیاد	۲۵	یامچی	نسبتاً زیاد	۴۰	هیر
خیلی زیاد	۱۰	زرنق	زیاد	۲۵	اسکو	نسبتاً زیاد	۴۰	ماکو
خیلی زیاد	۱۰	دوزدوزان	زیاد	۲۵	میانه	نسبتاً زیاد	۴۰	قوشچی
خیلی زیاد	۱۰	بستان آباد	زیاد	۲۵	کوزه	نسبتاً زیاد	۴۰	سرو

خیلی زیاد	۱۰	ترکمانچای	زیاد	۲۵	کورائیم	نسبتاً زیاد	۴۰	صومعه سرا
خیلی زیاد	۱۰	زرآباد	زیاد	۲۰	کلور	نسبتاً زیاد	۴۰	سیس
خیلی زیاد	۵	نیر	زیاد	۲۰	سلماس	نسبتاً زیاد	۴۰	وایقان
خیلی زیاد	۵	فیروق	زیاد	۲۰	تازه شهر	نسبتاً زیاد	۴۰	ممقان
خیلی زیاد	۵	خوی	زیاد	۲۰	ارومیه	نسبتاً زیاد	۴۰	کلیسا کندی
خیلی زیاد	۵	سیلوانه	زیاد	۲۰	نقده	نسبتاً زیاد	۴۰	خاروانا
خیلی زیاد	۵	نالوس	زیاد	۲۰	پیرانشهر	زیاد	۳۵	نوشین شهر
خیلی زیاد	۵	ورزقان	زیاد	۲۰	بازارجمعه	زیاد	۳۵	محمديار
خیلی زیاد	۵	طسوج	زیاد	۲۰	شرفخانه	زیاد	۳۵	گوراب زرمی
خیلی زیاد	۵	تبریز	زیاد	۲۰	هریس	زیاد	۳۵	کلیبر
خیلی زیاد	۵	شربیان	زیاد	۲۰	خواجه	زیاد	۳۵	صوفیان
خیلی زیاد	۵	گردکشان	زیاد	۲۰	باسمنج	زیاد	۳۵	شبستر
خیلی زیاد	۵	قگور	زیاد	۲۰	ترک	زیاد	۳۵	ایلخچی

بحث

تحلیل تراکم کرنل نشان داد که توزیع زمین‌لرزه‌ها در شمال غرب ایران الگویی خوشه‌ای دارد، به‌ویژه در امتداد گسل‌های تبریز، سلماس، خوی و مکران. این الگو با یافته‌های وانگ و همکاران (۲۰۲۰) و استاین و همکاران (۲۰۱۲) همخوان است که بر تمرکز لرزه‌ای در گسل‌های فعال تأکید کرده‌اند. مدل‌های خودسازمان‌یافتگی بحرانی نیز تجمع انرژی در ساختارهای شهری را عامل شکل‌گیری الگوهای پریسک می‌دانند (گریکو و همکاران، ۲۰۱۷)، که با نتایج این تحقیق در پیرامون شهرهای پرتراکم هم‌راستاست. یافته‌ها همچنین با مطالعه آمادور لونا و همکاران (۲۰۲۴)، که با استفاده از KDE در ترکیه و سوریه تمرکز زلزله‌ها را در امتداد ساختارهای تکتونیکی شناسایی کردند، مطابقت دارد.

علاوه بر تحلیل‌های مکانی، بررسی توالی زمانی زمین‌لرزه‌ها نیز نشان داد که در دو دهه اخیر، روند افزایشی نسبی در فراوانی زلزله‌های با بزرگای متوسط (۴ تا ۵.۵ ریشتر) در حاشیه گسل‌های تبریز، خوی و سلماس قابل‌مشاهده است. این روند زمانی، به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۰، با الگوی توزیع خوشه‌های آماری لرزه‌ای هم‌پوشانی داشته و بیانگر احتمال فعال‌تر شدن نواحی خاص در اثر باز توزیع تنش‌ها در پوسته زمین است. بنابراین، از منظر تحلیل فضا-زمانی، روند زمانی وقوع زمین‌لرزه‌ها مکملی برای تحلیل‌های مکانی محسوب شده و اهمیت پایش بلندمدت الگوهای لرزه‌ای را دوچندان می‌سازد؛ موضوعی که پترسن و همکاران (۲۰۲۰) و موسوی و همکاران (۲۰۲۰) نیز در مطالعات خود بر آن تأکید کرده‌اند. درعین‌حال، برخلاف برخی مطالعات داخلی همچون افسری و همکاران (۲۰۲۳)، که بر مقیاس شهری تمرکز دارند، مطالعه حاضر با رویکرد فضا-زمانی در مقیاس منطقه‌ای انجام شده است؛ تفاوتی که ناهمخوانی ظاهری با نتایج محلی نظیر باب‌الحوائجی و همکاران (۲۰۲۳) و صدری‌کیا و همکاران (۲۰۱۷) را توضیح می‌دهد.

تمرکز خود را بر تحلیل لرزه‌ای در مقیاس بلوک‌های شهری با داده‌های ساختاری و کالبدی معطوف کرده‌اند، مطالعه حاضر به تحلیل منطقه‌ای در مقیاس فراشهری و با رویکرد فضا-زمانی پرداخته است. همین تفاوت مقیاس تحلیل می‌تواند دلیلی برای برخی ناهمخوانی‌های ظاهری با نتایج محلی نظیر باب‌الحوائجی و همکاران (۲۰۲۳) یا صدری‌کیا و همکاران (۲۰۱۷)، باشد که بیشتر بر تحلیل‌های ایستا و تک‌بعدی تمرکز داشته‌اند.

تحلیل لکه‌های داغ و سرد با استفاده از آماره Getis-Ord G_i^* نشان داد که شهرهایی چون تبریز، ارومیه، سلماس و خوی در مناطق دارای تراکم بالای رخدادهای لرزه‌ای قرار دارند. این نتایج با یافته‌های توکلی و غفوری آشتیانی (۲۰۱۷)، هم‌راستا است که بر نقش موقعیت ساختاری شهرهای بزرگ شمال غرب ایران در افزایش ریسک لرزه‌ای تأکید کرده‌اند. علاوه بر این، مطالعه حاضر با یافته‌های ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، که از تحلیل G_i^* برای تعیین نواحی دارای تمرکز

تلفات در زلزله لودیای چین استفاده کردند، همسویی روش‌شناختی دارد؛ اما نوآوری این تحقیق در آن است که تحلیل Gi^* را با سایر تکنیک‌های خوشه‌بندی مانند موران و KDE تلفیق کرده و در مقیاسی منطقه‌ای به کار گرفته است. همچنین برخلاف برخی مطالعات با داده‌های محدود (یاریان و همکاران، ۲۰۲۰)، این پژوهش با استفاده از پایگاه داده ۲۸ ساله، الگوهای پایدار و تکرارشونده لرزه‌ای را با دقت بالا استخراج کرده است.

در بررسی الگوی فضایی زمین‌لرزه‌ها با تحلیل موران محلی، مشخص شد که خوشه‌های آماری قوی عمدتاً در حوالی گسل‌های تبریز، سلماس و جنوب غرب آذربایجان غربی شکل گرفته‌اند. در این میان، مناطق جدیدی در جنوب شرقی آذربایجان غربی به‌عنوان خوشه‌های با ریسک بالا شناسایی شدند که در برخی مطالعات داخلی پیشین، نظیر هستی و همکاران (۲۰۲۲) و یا باب‌الحوائجی و همکاران (۲۰۲۳) کمتر موردتوجه قرار گرفته‌اند. همین ناهمسویی با مطالعات قبلی، به دلیل مقیاس کلان‌تر تحلیل و ترکیب هم‌زمان چند شاخص فضایی و زمانی در مطالعه حاضر است. همچنین، مشابهت‌هایی با مطالعات بین‌المللی مانند اسکورتیوسکی و همکاران (۲۰۲۵) در قفقاز جنوبی نیز مشاهده می‌شود که خوشه‌بندی لرزه‌ای را در بازه‌های طولانی‌مدت تحلیل کرده‌اند. بنابراین، یکی از نوآوری‌های پژوهش حاضر، استفاده ترکیبی از سه تکنیک پیشرفته تحلیل فضایی-زمانی (KDE، موران، Gi) در سطح فراشهری است که نسبت به رویکردهای منفرد در پژوهش‌های پیشین، مزیت روش‌شناختی محسوب می‌شود.

تحلیل خوشه‌های داغ نشان داد که کانون‌های پرخطر زمین‌لرزه در امتداد گسل‌های اصلی شمال غرب ایران، به‌ویژه شمال تبریز، جنوب ارومیه و مرز با ترکیه متمرکزند، که با نتایج سسکا (۲۰۲۰) همخوانی دارد. هرچند برخی عوامل ژئوتکنیکی مانند نوع خاک بررسی نشده‌اند، تنظیم دقیق پارامترهای مکانی و فیلترهای کیفی دقت تحلیل GIS را افزایش داده است.

اولویت‌بندی شهرهای پرخطر با ترکیب تحلیل تراکم فضایی، فاصله از کانون‌ها، و شاخص‌های آماری مکانی، نشان داد که تبریز، ارومیه، سراب و مراغه در معرض بالاترین آسیب‌پذیری لرزه‌ای هستند. این نتایج با یافته‌های فیاض و همکاران (۲۰۲۳) و علمدار (۲۰۲۵) هم‌راستا است که بر نقش GIS در شناسایی نواحی پر ریسک تأکید کرده‌اند.

اگر چه در این پژوهش، به‌طور مستقیم به کیفیت ساخت‌وساز و مقاومت زیرساخت‌ها پرداخته نشده، اما تحلیل‌های فضایی-زمانی به‌صورت غیرمستقیم بازتاب‌دهنده الگوهای کالبدی آسیب‌پذیر بوده است؛ امری که با مدل‌های شاخص محور گریکو و همکاران (۲۰۱۷) نیز تأیید شده است.

پژوهش حاضر با تکیه بر رویکرد ترکیبی فضا-زمانی لرزه‌خیزی، توانسته است خلأ تحلیل‌های منطقه‌ای را پوشش دهد. درحالی‌که مطالعاتی مانند علی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱) و افسری و همکاران (۲۰۲۳) محدود به مقیاس شهری بوده‌اند، این تحقیق چارچوب یکپارچه و مقیاس‌پذیری برای تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای در سطح منطقه‌ای ارائه می‌دهد. برخلاف مطالعات یاریان و همکاران (۲۰۲۱) که از مدل‌های ANN بهره برده‌اند، رویکرد حاضر بر کاربرد در تصمیم‌سازی مدیریت شهری و منطقه‌ای دارد. یافته‌های مشکینی و علیپور (۱۴۰۳) درباره نقش شاخص‌های انسانی در افزایش خطرپذیری، و نیز پژوهش پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۷) در ضعف زیرساخت‌های حیاتی تبریز، و مطالعه کریمی قطب‌آبادی و زنگی‌آبادی (۱۴۰۲) درباره ترکیب شاخص‌های کالبدی، اجتماعی و مدیریتی، همگی مؤید اعتبار تحلیلی و نتایج این پژوهش هستند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی-زمانی رخدادهای لرزه‌ای در منطقه شمال غرب ایران در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ (۱۹۹۶-۲۰۲۴)، با بهره‌گیری از تکنیک‌های تحلیل پیشرفته در محیط GIS و داده‌های لرزه‌ای گسترده انجام شد. در مجموع، ۲۲۷۸ رخداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۴ در این منطقه ثبت شده است که از این میان، ۹۵ زلزله با بزرگای بالای ۵ و ۱۴ زلزله با بزرگای بیش از ۶ ریشتر به ثبت رسیده‌اند. تحلیل چگالی کرنل (KDE) نشان داد که بیشترین تراکم رخدادها در پیرامون گسل‌های تبریز، سلماس، مکران و خوی-زرآباد متمرکز شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که سه خوشه اصلی لرزه‌ای در اطراف شهرهای تبریز، خوی و سلماس شناسایی شد. همچنین، تحلیل لکه‌های داغ و سرد با استفاده از آماره $Getis-Ord\ Gi^*$ نشان داد که ۴۲ ناحیه شهری در پهنه‌های داغ با سطح معناداری بالا ($p < 0.01$) قرار دارند که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای این نواحی در برابر زمین‌لرزه است.

بررسی الگوی فضایی رخدادها با استفاده از تحلیل موران (Local Moran's I) نیز نشان داد که حدود ۶۷ درصد از زلزله‌ها در قالب الگوهای خوشه‌ای معنادار فضایی قرار دارند. افزون بر این، تحلیل عمق زلزله‌ها مشخص کرد که بیش از ۷۵ درصد رخدادها دارای عمق کانونی کمتر از ۱۵ کیلومتر بوده‌اند؛ این مسئله نشان‌دهنده پتانسیل بالای تخریب در مناطق شهری پرجمعیت است. در نهایت، تحلیل تلفیقی آسیب‌پذیری شهری نشان داد که شهرهای تبریز، ارومیه، خوی، سلماس، مراغه، نقده و میاندوآب در بالاترین سطح اولویت برای مداخلات کاهش خطر قرار دارند.

یافته‌های پژوهش با نتایج مطالعات قبلی در تبریز، همدان و سنجند (Afsari et al., 2023; Yariyan et al., 2021; Babolhavaegi et al., 2023) همسوس است که همگی بر تمرکز آسیب‌پذیری در مناطق پرتراکم و مرکزی تأکید داشته‌اند. همچنین، نتایج با مدل‌سازی‌های منطقه‌ای در ترکیه، مالزی و ایتالیا قابل‌مقایسه است که در آن‌ها نیز، تلفیق شاخص‌های کالبدی-اجتماعی با داده‌های لرزه‌ای در محیط GIS به‌عنوان روشی مؤثر برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی معرفی شده است (Fayaz et al., 2023; Sauti et al., 2021; Leggieri et al., 2022). از سوی دیگر، پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات داخلی، از نظر پوشش منطقه‌ای، بازه زمانی طولانی، و استفاده هم‌زمان از چندین تکنیک پیشرفته تحلیل فضایی مانند KDE ، Gi و $Moran's\ I$ ، رویکردی جامع‌تر و دقیق‌تر ارائه داده که می‌تواند الگویی برای تحلیل‌های مشابه در سایر مناطق لرزه‌خیز کشور باشد.

با توجه به نتایج حاصل، پیشنهاد می‌شود در راستای کاهش آسیب‌پذیری منطقه، از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مانند PROMETHEE-VIKOR و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در محیط GIS برای اولویت‌بندی شهرها، شناسایی گره‌های پرخطر زیرساختی و برنامه‌ریزی مقاوم‌سازی هدفمند استفاده شود. همچنین، طراحی و توسعه پایگاه‌های داده مکانی برای بلوک‌های ساختمانی شهری، مشابه مدل ایتالیایی (Leggieri et al., 2022)، می‌تواند زمینه‌ساز استقرار سامانه‌های هشدار سریع و پایش مستمر خطر باشد.

در نهایت، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌ای، شاخص‌های کالبدی-اجتماعی و تحلیل‌های آماری پیشرفته در محیط GIS، گامی نوآورانه و کاربردی در جهت شناسایی نواحی پرخطر، تدوین راهبردهای داده‌محور برای کاهش آسیب‌پذیری، و ارائه چارچوب تصمیم‌یار برای مدیریت بحران در شمال غرب ایران برداشته است. این رویکرد می‌تواند در برنامه‌ریزی توسعه پایدار شهری و ارتقاء تاب‌آوری مناطق مشابه در سطح ملی به کار گرفته شود. باین‌حال، اجرای چنین سامانه‌هایی مستلزم غلبه بر چالش‌هایی نظیر هزینه بالای راه‌اندازی زیرساخت‌های هشدار سریع، کمبود داده‌های دقیق در مقیاس بلوک شهری، و موانع قانونی و نهادی در اصلاح مقررات ساخت‌وساز مقاوم است. پرداختن به این موانع

می‌تواند کارایی برنامه‌های پیشنهادی را افزایش دهد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رسانده‌اند، به‌ویژه افرادی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- پورمحمدی، محمدرضا؛ یوسفی شهیر، هانیه و حسین‌زاده دلیر، کریم. (۱۳۹۷). ارزیابی تاب‌آوری کاربری‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز در برابر مخاطره طبیعی زلزله. *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۶ (۱)، ۷۴-۵۵.
<https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2018.247162.826>
- کریمی قطب‌آبادی، فضل‌اله و زنگی‌آبادی، علی. (۱۴۰۲). تدوین سناریوهای ارتقاء تاب‌آوری سکونتگاه‌های شهری جدید در برابر خطر زلزله مطالعه موردی: منطقه شهری اصفهان بزرگ. *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱۱ (۲)، ۱۷۵-۱۹۳.
<https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2023.348871.1735>
- مرکز ملی آمار ایران (۱۴۰۰). <https://amar.thmporg.ir>
- مشکینی، ابوالفضل و علیپور، سمیه. (۱۴۰۳). تحلیل تاب‌آوری اجتماعی مسکن محلات شهری در برابر زلزله مطالعه موردی: محلات منطقه ۱۵ شهر تهران. *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱۲ (۳)، ۲۳-۱.
<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2024.378878.1963>
- مهرپویان، مجتبی؛ جامی، محسن؛ خطیب، محمدمهدی؛ سرحدی، نازنین. (۱۳۹۵). گسلش فعال در طول گسل تبریز (شمال غرب ایران). *نشریه جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۶ (۱۹)، ۲۰۱-۲۱۶.

References

- Afsari, R., Nadizadeh Shorabeh, S., Bakhshi Lomer, A. R., Homae, M., & Arsanjani, J. J. (2023). Using Artificial Neural Networks to Assess Earthquake Vulnerability in Urban Blocks of Tehran. *Remote Sensing*, 15(5), 1248. <https://doi.org/10.3390/rs15051248>
- Alemdar, K. D. (2025). Seismic risk assessment of transportation networks for the impending Istanbul earthquake with GIS-based MCDM approach. *Natural Hazards*, 121(9), 10085-10123. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07199-y>
- Alizadeh, M., Zabihi, H., Rezaie, F., Asadzadeh, A., Wolf, I. D., Langat, P. K., Khosravi, I., Beiranvand Pour, A., Mohammad Nataj, M., & Pradhan, B. (2021). Earthquake Vulnerability Assessment for Urban Areas Using an ANN and Hybrid SWOT-QSPM Model. *Remote Sensing*, 13(22), 4519. <https://doi.org/10.3390/rs13224519>

- Allen, R. M., & Melgar, D. (2019). Earthquake early warning: Advances, scientific challenges, and societal needs. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1), 361-388. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060457>
- Amador Luna, D., Alonso-Chaves, F. M., & Fernández, C. (2024). Kernel Density Estimation for the Interpretation of Seismic Big Data in Tectonics Using QGIS: The Türkiye–Syria Earthquakes (2023). *Remote Sensing*, 16(20), 3849. <https://doi.org/10.3390/rs16203849>
- Azad, S. S., Philip, H., Dominguez, S., Hessami, K., Shahpasandzadeh, M., Foroutan, M., ... & Lamothe, M. (2015). Paleoseismological and morphological evidence of slip rate variations along the North Tabriz fault (NW Iran). *Tectonophysics*, 640, 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.11.010>
- Babolhavaegi, H. R. et al. (2023). Assessment of seismic vulnerability in urban and rural health service centers of Hamadan Province using GIS. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*, 8(3), 201–210. <http://dx.doi.org/10.32598/hdq.8.3.494.1>
- Cesca, S. (2020). Seiscloud, a tool for density-based seismicity clustering and visualization. *Journal of Seismology*, 24(3), 443-457. <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09921-8>
- Doğan, A., Başeğmez, M., & Aydın, C. C. (2025). Assessment of the seismic vulnerability in an urban area with the integration of machine learning methods and GIS. *Natural Hazards*, 121(8), 9613-9652. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07185-4>
- Fayaz, M., Romshoo, S., Rashid, I., & Chandra, R. (2023). Earthquake Vulnerability Assessment of the Built Environment in Srinagar City, Kashmir Himalaya, Using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1-35. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1593-2023>
- Greco, A., Pluchino, A., Barbarossa, L., Calì, I., Martinico, F., & Rapisarda, A. (2017). A simplified model based on self-organized criticality framework for the seismic assessment of urban areas. *arXiv preprint arXiv:1711.03391*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.03391>
- Han, S. W., & Choi, Y. S. (2008). Seismic hazard analysis in low and moderate seismic region-Korean peninsula. *Structural Safety*, 30(6), 543-558. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2007.10.004>
- Hasti, F., Rouhi, H., Pezhooli, N., SalmanMahiny, A., & Rostami, H. (2022). Zoning and spatial vulnerability assessment with emphasis on infrastructure using GIS (case study: Kurdistan Province, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(115). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09383-3>
- Hotovec-Ellis, A. J., Shiro, B. R., Shelly, D. R., Anderson, K. R., Haney, M. M., Thelen, W. A., ... & Johanson, I. A. (2022). Earthquake-derived seismic velocity changes during the 2018 caldera collapse of Kilauea volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB023324. <https://doi.org/10.1029/2021JB023324>
- Karimi Ghotbabadi, F. and zangiabadi, A. (2023). Preparation of scenarios to improve the resilience of new urban habitations against earthquake risk the case study of Isfahan metropolitan. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 11(2), 175-193. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2023.348871.1735>. [In Persian].
- Karimzadeh, S., Cakir, Z., Osmanoglu, B., Schmalzle, G., Miyajima, M., Amiraslanzadeh, R., & Djamour, Y. (2013). Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault (NW Iran) deduced from InSAR time series. *Journal of Geodynamics*, 66, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.02.003>
- Kwon, J., Zheng, Y., & Jun, M. (2023). Flexible spatio-temporal Hawkes process models for earthquake occurrences. *Spatial Statistics*, 54, 100728. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2023.100728>
- Leggieri, V., Mastrodonato, G., & Uva, G. (2022). GIS multisource data for the seismic vulnerability assessment of buildings at the urban scale. *Buildings*, 12(5), 523. <https://doi.org/10.3390/buildings12050523>
- Matin SS, Pradhan B. Earthquake-Induced Building-Damage Mapping Using Explainable AI (XAI). *Sensors*. (2021); 21(13):4489. <https://doi.org/10.3390/s21134489>
- Mehrpooyan, M., Jami, M., Khatibi, M.M., & Sarhadi, N. (2016). Active faulting along the Tabriz Fault (Northwest Iran). *Geography and Regional Urban Planning Journal*, 6(19), 201–216. [In Persian].
- Meshkini, A. and Alipour, S. (2024). Analysis of the social resilience of housing in urban areas against earthquakes: the case study of areas of the 15th district of Tehran. *Geographical*

- Urban Planning Research (GUPR)*, 12(3), 1-22. <http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2024.378878.1963>. [In Persian].
- Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., & Beroza, G. C. (2020). Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature communications*, 11(1), 3952. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>
- Petersen, M. D., Shumway, A. M., Powers, P. M., Field, E. H., Moschetti, M. P., Jaiswal, K. S., ... & Witter, R. C. (2024). The 2023 US 50-state national seismic hazard model: Overview and implications. *Earthquake Spectra*, 40(1), 5-88. <https://doi.org/10.1177/8755293019878199>
- Petersen, M. D., Shumway, A. M., Powers, P. M., Mueller, C. S., Moschetti, M. P., Frankel, A. D., ... & Zeng, Y. (2020). The 2018 update of the US National Seismic Hazard Model: Overview of model and implications. *Earthquake Spectra*, 36(1), 5-41. <https://doi.org/10.1177/87552930231215428>
- Poor Mohammadi, M. R., Yousefi Shahir, H. and Hoseinzadeh Dalir, K. (2018). Resilience of Vital Landuses against Earthquake Disaster in Tabriz Metropolis. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 6(1), 55-74. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2018.247162.826>. [In Persian].
- Rizza, M., Vernant, P., Ritz, J. F., Peyret, M., Nankali, H., Nazari, H., ... & Masson, F. (2013). Morphotectonic and geodetic evidence for a constant slip-rate over the last 45 kyr along the Tabriz fault (Iran). *Geophysical Journal International*, 193(3), 1083-1094. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt041>
- Sadrykia, M., Delavar, M. R., & Zare, M. (2017). A GIS-based fuzzy decision making model for seismic vulnerability assessment in areas with incomplete data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 119. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040119>
- Sammartano, G., Avena, M., Fillia, E., & Spanò, A. (2023). Integrated HBIM-GIS Models for Multi-Scale Seismic Vulnerability Assessment of Historical Buildings. *Remote Sensing*, 15(3), 833. <https://doi.org/10.3390/rs15030833>
- Sauti, N. S., Daud, M. E., Kaamin, M., & Sahat, S. (2021). GIS spatial modelling for seismic risk assessment based on exposure, resilience, and capacity indicators to seismic hazard: A case study of Pahang, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1948-1972. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1947903>
- Skurativskiy, S., Mykulyak, S., Semenova, Y., & Skurativska, K. (2025). Cluster and statistical analysis of spatial earthquake patterns in the South Caucasus region. *Acta Geophysica*, 1-15.
- Statistical Center of Iran. (2022). *National population and housing statistics*. <https://amar.thmporg.ir>. [In Persian].
- Talebian, M., & Jackson, J. (2004). A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysical Journal International*, 156(3), 506–526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x>
- Tavakoli, B., & Ghafory-Ashtiany, M. (2017). Seismic hazard assessment of Iran. *Journal of Seismology*, 21(2), 357-371. <https://doi.org/10.1007/s10950-016-9619-4>
- United States Geological Survey (USGS). (2023). *What magnitude does damage begin to occur in an earthquake?* U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/faqs/what-magnitude-does-damage-begin-occur-earthquake>
- Wang, Y., & Chen, H. (2019). Geological structures and seismic risk assessment in tectonic zones. *Journal of Geophysical Research*, 124(6), 567-583. <https://doi.org/10.1029/2018JB016472>
- Yamagishi, Y., Saito, K., Hirahara, K., & Ueda, N. (2021). Spatio-temporal clustering of earthquakes based on distribution of magnitudes. *Applied Network Science*, 6(1), 71. <https://doi.org/10.1007/s41109-021-00413-3>
- Yariyan, P., Ali Abbaspour, R., Chehreghan, A., Karami, M., & Cerdà, A. (2021). GIS-based seismic vulnerability mapping: a comparison of artificial neural networks hybrid models. *Geocarto International*, 37(15), 4312–4335. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1892208>
- Yariyan, P., Avand, M., Soltani, F., Ghorbanzadeh, O., & Blaschke, T. (2020). Earthquake Vulnerability Mapping Using Different Hybrid Models. *Symmetry*, 12(3), 405. <https://doi.org/10.3390/sym12030405>
- Zhang, L., Tao, Z., & Wang, G. (2022). Assessment and determination of earthquake casualty gathering area based on building damage state and spatial characteristics

analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102688.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102688>

