Journal of Sustainable City

Online ISSN: 2476-6151

Journal Homepage: www.jscity.ir

Seismic Hazard Zoning with Emphasis on Urban Development Components: A case study of Zanjan City

Eskandar Nemati [1], Soheila Hamidzadeh Khiavi [2], Hossein Nazmfar [3]

1. *Department of Urban Planning, Mara. C., Islamic Azad University, Marand, Iran*
Email: es.nemati@iau.ir
2. (Corresponding Author) *Department of Art and Architecture, Shab. C., Islamic Azad University, Shabestar, Iran*
Email: 5048803108@iau.ac.ir
3. *Department of Geography and Rural Planning, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
Email: nazmfar@tabrizu.ac.ir

ARTICLEINFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received:
14 March 2026
Received in revised form:
5 June 2026
Accepted:
30 June 2026
Available online:
3 August 2026

Keywords:
Seismic Hazard,
Urban Development,
Analytic Network Process (ANP),
Fuzzy Logic,
Geographic Information System (GIS),
Zanjan City.

ABSTRACT

The city of Zanjan, due to its location within an active tectonic zone and its proximity to the Soltaniyeh and North Zanjan faults, together with the accelerated pace of urban development in recent decades, is exposed to a high level of seismic risk. The present study was conducted with the aim of seismic hazard zonation in Zanjan, with emphasis on urban development components and assessment of the degree of physical and spatial vulnerability. In terms of purpose, this research is applied, and in terms of nature, it is descriptive-analytical. To assess vulnerability, 5 main criteria and 21 sub-criteria were identified based on the theoretical foundations and the opinions of 20 experts. The weighting of the criteria was carried out using the Analytic Network Process (ANP), and the limit supermatrix was extracted. Spatial layers were standardized in the ArcGIS environment using fuzzy membership functions and were integrated through the Raster Calculator tool. The ANP results showed that the physical-structural criterion, with a weight of 41.839%, and the natural criterion, with a weight of 22.150%, had the greatest influence on the seismic vulnerability of Zanjan. The areal assessment of the overall hazard zonation indicated that 18.4% of the city's area lies within the very high-risk zone, 32.1% within the high-risk zone, 28.5% within the moderate-risk zone, and 21.0% within the low to very low-risk zones. The southern and western areas of the city, as well as the northeastern areas, are the most unsafe parts of the city. Continuous spatial analysis shows that Zanjan's vulnerability follows a patchy and heterogeneous pattern. In order to enhance urban resilience, it is essential to formulate strict construction regulations for new developments in the northeast and to undertake physical regeneration of the deteriorated central and southern urban fabrics.

Citation: Nemati, E., Hamidzadeh Khiavi, S., & Nazmfar, H. (2026). Seismic Hazard Zoning with Emphasis on Urban Development Components: A case study of Zanjan City. *Journal of Sustainable City*, 9(2), 141-165.
http://doi.org/10.22034/jsc.2026.587261.1919

© The Author(s)

Publisher: Iranian Geography and Urban Planning Association

Extended Abstract

Introduction

Earthquake is one of the most significant and destructive natural hazards, inflicting extensive damage annually on human societies, urban infrastructure, and national economies. Unlike many natural hazards, earthquakes often occur without prior warning and can, within a short period, cause widespread building destruction, disruption of critical network functions, reduction in urban service delivery capacity, and trigger socio-economic crises. Although preventing earthquake occurrence is impossible, the experience of various countries has demonstrated that the magnitude of human and material losses depends more on the physical and social vulnerability of cities, the quality of spatial planning, the manner of activity distribution, and the level of preparedness of the urban management system, rather than solely on earthquake magnitude. Consequently, over the past two decades, the disaster management approach has shifted from reactive crisis management toward preventive risk management, enhancement of urban resilience, and hazard-based planning—an approach that emphasizes the identification of high-risk zones, vulnerability reduction, and the guidance of urban development toward safe areas (UNDRR, 2022; Shafapour Tehrany et al., 2023).

Although earthquake hazard is inherently natural in nature, the extent of its damages is largely influenced by the physical and functional characteristics of cities. Factors such as distance from active faults, geological and geotechnical conditions, slope and topography, alongside indicators including building quality and age, construction materials, population density, building density, land use patterns, accessibility to road networks, distribution of emergency centers, and quality of urban infrastructure, play a decisive role in increasing or decreasing urban vulnerability. From this perspective, an earthquake is not merely a geological phenomenon but rather the consequence of a complex interaction between natural processes and urban development patterns. Therefore, risk reduction necessitates the adoption of an integrated approach that simultaneously addresses natural, physical, social, and managerial dimensions.

In such circumstances, seismic hazard zoning, as one of the most critical spatial planning tools, enables the identification of areas with relative risk, determination of intervention priorities, guidance of urban development, appropriate location of sensitive land uses, formulation of construction regulations, and optimal management of urban investments. Numerous studies have demonstrated that the use of Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, fuzzy logic, and network models significantly enhances the accuracy of hazard assessment and decision-making capability for urban managers, as these methods are capable of simultaneously considering multiple criteria and their complex interrelationships within the analysis process.

In this context, Zanjan City, as the political, administrative, and economic center of Zanjan Province, has experienced an increasing trend of physical development, expansion of urban settlements, and intensification of economic activities over the past three decades. The horizontal expansion of the city, development of new towns, increased building density, and concentration of critical infrastructure have rendered the importance of planning based on natural hazard assessment more evident than ever before. On the other hand, the city's location within a zone influenced by the active fault systems of northwestern Iran has meant that the probability of destructive earthquakes has consistently been regarded as one of the most significant threats to Zanjan's urban development. Geological studies indicate that the Mahneshan, Soltanieh, Sohrein, and Abbar faults constitute the most important active structures in the region, which have played a fundamental role in the tectonic evolution of the Zanjan Plain.

Accordingly, the primary objective of the present study is to conduct seismic hazard zoning in Zanjan City with an emphasis on urban development components and to provide an analytical framework to support spatial decision-making. In pursuit of this

objective, the present study seeks to answer two fundamental questions: First, what are the most important criteria and sub-criteria affecting seismic hazard zoning in Zanjan City with an emphasis on urban development, and what is the relative contribution of each to the formation of the spatial vulnerability pattern? Second, what picture of the spatial distribution of seismic hazard zones in Zanjan City does the integration of the Analytic Network Process (ANP) model, fuzzy logic, and Geographic Information Systems (GIS) present, and what implications do the results hold for urban development policy and planning?

Methodology

The present study is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in nature, conducted through an exploratory sequential mixed method approach. In this research, the most important indicators affecting seismic vulnerability and urban development were first extracted through documentary studies, review of scientific literature, and examination of domestic and international research. Subsequently, the identified indicators were refined and finalized using expert opinion. In the qualitative phase, the primary role of the research was to identify and explain the criteria and sub-criteria affecting seismic hazard zoning, while in the quantitative phase, these indicators were converted into measurable variables, and weighting, standardization, and spatial analysis were performed. Thus, the point of integration between the qualitative and quantitative sections occurred at the stage of forming the decision-making model and spatial analysis, such that the output of the qualitative phase served as the basis for designing the quantitative model and producing the final zoning map. The statistical population of the specialized section of the research comprised experts in the fields of urban planning, urban development, crisis management, geology, civil engineering, and geographic information systems. Purposive sampling was employed, and 20 specialists with at least a Master's degree, relevant academic or executive experience, and sufficient familiarity with urban planning and natural hazard topics participated in the research. Pairwise comparison questionnaires were distributed to experts both in person and electronically. After collection, the reliability of the instrument was assessed using Cronbach's alpha coefficient, which yielded a value of 0.802, indicating acceptable reliability of the questionnaire.

Following indicator extraction, 21 sub-criteria were organized within five main criteria, including Natural Factors, Physical-Structural Factors, Accessibility, Socio-Economic Factors, and Urban Services. To determine the relative importance and interrelationships among these criteria, the Analytic Network Process (ANP) model was employed, as unlike the hierarchical AHP method, this model enables the analysis of dependence and feedback among criteria (Saaty, 2005). Pairwise comparison matrices were completed based on Saaty's 9-point scale, and after calculating the eigenvectors, the initial supermatrix, weighted supermatrix, and limit supermatrix were derived, and the final weights of the criteria were extracted. Furthermore, the inconsistency ratio of all matrices was less than 0.10, indicating satisfactory consistency of expert judgments. The weights obtained from the ANP model were assigned to the standardized layers, and all spatial data were integrated in the ArcGIS software environment using the Weighted Overlay method. The application of this method enabled the simultaneous combination of criterion weights with fuzzy membership degrees, and the final seismic hazard zoning map of Zanjan City was produced in five classes: very low, low, moderate, high, and very high. The final classification was performed using the Natural Breaks (Jenks) method to achieve maximum differentiation among different zones. Finally, the results of the zoning were compared with the physical characteristics of the city, building quality, building density, road network accessibility status, and spatial distribution of urban land uses to assess the degree of correspondence between the obtained spatial pattern and the actual conditions of the city.

Results and Discussion

The research findings demonstrated that the seismic risk pattern in Zanjan City does not follow a uniform distribution, and there exist considerable differences among various areas of the city in terms of vulnerability levels. Based on the weights derived from the ANP model, the Physical-Structural criterion exerted the greatest influence on the formation of the final risk pattern, indicating the decisive role of built environment quality, building characteristics, and the physical structure of the city in reducing or increasing earthquake-induced damages. Furthermore, it was determined that natural, service-related, and demographic factors, in interaction with one another, shape the final risk pattern, and none of these alone can explain the city's vulnerability status.

From an urban planning perspective, the research results indicate that earthquake risk reduction necessitates the adoption of an integrated approach in urban development management. Directing the city's future development toward suitable zones, enhancing construction quality, regenerating deteriorated urban fabrics, strengthening the road network, improving the distribution of healthcare and emergency centers, and preserving and developing urban open spaces represent the most critical measures that can enhance the city's resilience capacity against earthquakes. Therefore, the zoning map produced in this study can serve as a practical tool for prioritizing urban interventions, revising development plans, and formulating crisis management programs for use by urban managers and planners.

The primary innovation of this research lies in the simultaneous integration of the ANP model, fuzzy logic, and GIS for multi-criteria seismic risk assessment with an emphasis on urban development. This approach, in addition to determining the relative importance of criteria, enables the spatial analysis of complex interrelationships among them and presents a more comprehensive picture of the city's vulnerability status. Accordingly, the proposed framework of this research has the potential for application in other seismically active cities across the country.

Conclusion

Nevertheless, the research results are influenced by the quality and scale of input data. Limitations in accessing certain up-to-date geological data, precise information on building characteristics, and some spatial layers constitute constraints of this study and may affect the accuracy of the final assessment. Therefore, it is recommended that future research employ higher spatial resolution data, updated seismotectonic information, remote sensing imagery, machine learning models, and analysis of various earthquake occurrence scenarios to conduct a more comprehensive assessment of seismic risk and vulnerability in Zanjan City and other cities of the country. Furthermore, examining the institutional, economic, and social dimensions of urban resilience alongside physical assessments can contribute to the formulation of more effective policies for risk reduction and the achievement of sustainable urban development.

In sum, the research findings indicate that enhancing Zanjan City's safety against earthquakes is not achieved solely through building retrofitting; rather, it requires a comprehensive perspective on urban development in which physical quality, distribution of public services, road network accessibility, open spaces, demographic characteristics, and natural considerations are simultaneously incorporated into urban development and management policies. Such an approach, while reducing vulnerability, can provide the foundation for realizing sustainable urban development and enhancing the city's resilience against natural hazards.

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.

مجلـــه شـــهر پایـــدار
شاپا الکترونیکی:2476-6151
Journal Homepage: www.jscity.ir

پهنه‌بندی خطر زلزله با تأکید بر مؤلفه‌های توسعه شهری
مطالعه موردی: شهر زنجان

اسکندر نعمتی [۱]، سهیلا حمیدزاده خیاوی [۲]✉، حسین نظم فر [۳]

۱- گروه شهرسازی، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، مرند، ایران. رایانامه: nematies@iau.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه هنر و معماری، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران. رایانامه:hamidzadeh79@iau.ir
۳- گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: nazmfar@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۱۲/۲۳
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۵/۰۳/۱۵
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۴/۰۹
تاریخ چاپ:
۱۴۰۵/۰۵/۱۲

واژگان کلیدی:
خطر زلزله،
توسعه شهری،
فرآیند تحلیل شبکه‌ای،
منطق فازی، سامانه اطلاعات جغرافیایی،
شهر زنجان.

چکیده

شهر زنجان به دلیل قرارگیری در زون تکتونیکی فعال و نزدیکی به گسل‌های سلطانیه و شمال زنجان، همراه با شتاب توسعه شهری در دهه‌های اخیر، در معرض خطر بالای لرزه‌ای قرار دارد. پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی خطر زلزله در زنجان با تأکید بر مؤلفه‌های توسعه شهری و سنجش میزان آسیب‌پذیری کالبدی و فضایی انجام‌شده است. این تحقیق از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی–تحلیلی است. جهت ارزیابی آسیب‌پذیری، ۵ معیار اصلی و ۲۱ زیر معیار بر اساس مبانی نظری و نظر ۲۰ نفر از خبرگان استخراج گردید. وزن دهی معیارها با فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و استخراج سوپر ماتریس حد انجام شد. لایه‌های مکانی در محیط ArcGIS با توابع عضویت فازی استانداردسازی شده و با ابزار Raster Calculator تلفیق شدند. نتایج ANP نشان داد که معیار کالبدی–ساختمانی با وزن ۴۱,۸۳۹ درصد و معیار طبیعی با وزن ۲۲,۱۵۰ درصد بیشترین تأثیر را در آسیب‌پذیری لرزه‌ای زنجان دارند. ارزیابی مساحتی پهنه‌بندی کلی خطر نشان داد که ۱۸,۴ درصد از مساحت شهر در پهنه با خطر بسیار بالا، ۳۲,۱ درصد در پهنه خطر بالا، ۲۸,۵ درصد در پهنه خطر متوسط و ۲۱,۰ درصد در پهنه خطر کم تا بسیار کم قرار دارند. نواحی جنوب، غرب و شمال شرق ناایمن‌ترین بخش‌های شهر هستند.تحلیل پیوسته فضایی نشان می‌دهد آسیب‌پذیری زنجان الگویی لکه‌ای و ناهمگون دارد. جهت ارتقای تاب‌آوری شهری، تدوین ضوابط سخت‌گیرانه ساخت‌وساز در توسعه‌های جدید شمال شرق و بازآفرینی کالبدی بافت‌های فرسوده مرکزی و جنوبی الزامی است.

استناد: نعمتی، اسکندر؛ حمیدزاده خیاوی، سهیلا و نظم فر، حسین. (۱۴۰۵). پهنه‌بندی خطر زلزله با تأکید بر مؤلفه‌های توسعه شهری مطالعه موردی: شهر زنجان. *مجله شهر پایدار*، ۹ (۲)، ۱۶۵-۱۴۱.

http://doi.org/10.22034/jsc.2026.587261.1919

© نویسندگان
ناشر: انجمن جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری ایران

مقدمه

مخاطرات طبیعی، به‌ویژه زمین‌لرزه، همواره به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات برای جوامع انسانی مطرح بوده‌اند و در سال‌های اخیر با افزایش شهرنشینی و تراکم جمعیت در شهرها، شدت و وسعت خسارات ناشی از این پدیده به‌طور چشمگیری افزایش‌یافته است. ایران به دلیل قرارگیری بر روی کمربند لرزه‌خیز آلپ–هیمالیا و وجود گسل‌های متعدد فعال، یکی از زلزله‌خیزترین کشورهای جهان محسوب می‌شود (پورمحمدی و مصیب‌زاده، ۱۳۸۷). بر اساس پژوهش‌های وزارت مسکن و شهرسازی، حدود ۵۰ درصد از جمعیت شهرنشین کشور در پهنه‌هایی زندگی می‌کنند که دارای بیشترین خطر زلزله‌خیزی هستند، به‌گونه‌ای که بخش اعظم مناطق مسکونی کشور در محدوده خطر نسبتاً بالا و قریب به تمام سرزمین در محدوده خطر نسبتاً متوسط رو به بالا قرار دارد (فرجی و همکاران، ۱۳۸۹). وقوع زلزله‌های مخرب متعدد در طول تاریخ نظیر بم، رودبار، طبس و بوئین‌زهرا، نشان داده است که بیش از نیمی از جمعیت کشور در معرض خطر جدی زمین‌لرزه قرار دارند و این مخاطره می‌تواند در هر لحظه فاجعه‌ای انسانی و اقتصادی بیافریند (محمدپور، ۱۳۹۸). بر اساس گزارش‌های سازمان ملل، مهم‌ترین سوانح طبیعی در ایران زلزله می‌باشد و در هر ده سال یک‌بار، شاهد زلزله‌ای ویرانگر هستیم که باعث بی‌خانمانی و کشته شدن عده زیادی می‌گردد (محمدپور، ۱۳۹۸).

در این میان، شهر زنجان به‌عنوان یکی از شهرهای مهم و تاریخی در شمال غرب کشور، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود و قرارگیری در منطقه‌ای زلزله‌خیز، همواره با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت مخاطرات طبیعی مواجه بوده است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). این شهر در محاصره سه گسل خطرناک شامل گسل زنجان در شمال، گسل سلطانیه در جنوب و گسل بیاتلر در غرب قرار دارد و بر اساس نقشه پهنه‌بندی زلزله تهیه‌شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، در پهنه درجه خطر نسبتاً زیاد قرار می‌گیرد (احدنژاد روشتی، ۱۳۸۸). به‌طوری‌که طبق اعلام مدیرکل مدیریت بحران استان، ۴۴ درصد از مساحت استان زنجان در پهنه با خطر بالای زلزله، ۴۸ درصد در پهنه با خطر متوسط و تنها هشت درصد از مساحت آن در پهنه با خطر پایین زلزله قرار دارد و وجود ۴۲ گسل در اطراف زنجان، این استان را به منطقه‌ای زلزله‌خیز تبدیل کرده است که برای در امان ماندن و کاستن از اثرات این زلزله‌ها، برنامه‌ریزی اصولی و علمی امری ضروری است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴؛ حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). تجربه تاریخی زلزله‌های ویرانگر در این ناحیه، از جمله زلزله رودبار–منجیل در سال ۱۳۶۹ با قدرت ۷٫۴ ریشتر که در شمال استان به وقوع پیوست و بالغبر ۴۰ هزار کشته برجای گذاشت، نشان از آسیب‌پذیری بالای این منطقه در برابر این پدیده طبیعی دارد (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). بررسی آمار زلزله‌های رخداده در بازه صدسال اخیر در شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر زنجان نشان می‌دهد که درمجموع ۲۷۶ زمین‌لرزه به ثبت رسیده است که کمترین آن ۳٫۴ ریشتر و بیشترین آن ۷٫۴ ریشتر بوده و میانگین زلزله‌های رخداده ۴٫۵ ریشتر برآورد شده است (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). این آمار نشان‌دهنده لرزه‌خیزی بالای منطقه و ضرورت توجه جدی به این مخاطره در برنامه‌ریزی‌های شهری است.

بااین‌حال، آنچه مسئله را به‌مراتب پیچیده‌تر و بحرانی‌تر می‌سازد، الگوی توسعه شهری ناهماهنگ و بی‌برنامه‌ای است که طی دهه‌های اخیر در این شهر شکل‌گرفته است. رشد سریع و توسعه شهری در زنجان، به‌ویژه در دهه‌های اخیر، به دلیل افزایش جمعیت و گسترش ساخت‌وساز، پهنه‌بندی دقیق خطر زلزله را بیش‌ازپیش ضروری ساخته است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). این توسعه که شامل افزایش تراکم ساختمانی و تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به مسکونی و تجاری شده، باعث گردیده تا مناطق بیشتری از شهر در معرض خطر قرار گیرند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تراکم ساختمانی در زنجان بین ۱۰۸ تا ۱۰۳ درصد در نوسان بوده و تراکم جمعیتی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ از ۵۸ به ۶۳ نفر در هر هکتار رسیده است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین، وجود ابنیه قدیمی با عمر متوسط و استفاده از مصالح

کم‌دوام در بخش‌هایی از شهر، از جمله عوامل کلیدی در افزایش ریسک زلزله محسوب می‌شود (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴؛ ضرغامی، ۲۰۱۷). بررسی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست نشان می‌دهد که رشد مساحتی شهر زنجان طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ بیش از دویست درصد افزایش‌یافته و وسعت مناطق شهری از ۱۷٫۵۶ کیلومترمربع به ۵۰٫۶۵ کیلومترمربع رسیده است (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). در یک نگاه کلی، تراکم جمعیت در هر کیلومترمربع از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ مستمراً کاهش‌یافته و در سال‌های بعد این روند تقریباً ثابت بوده است؛ اما نکته حائز اهمیت آن است که رشد و جهش شهر زنجان در بازه موردبررسی به‌طور قابل‌توجهی به سمت مناطق با خطر زلزله زیاد (به‌ویژه جنوب و غرب) پیش رفته است (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). به عبارتی، توسعه شهری در زنجان بدون توجه به اصول مکان‌یابی علمی و ظرفیت‌های زمین‌شناسی انجام‌گرفته و این امر، آسیب‌پذیری شهر را در برابر زلزله دوچندان کرده است.

مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مطالعات در حوزه پهنه‌بندی خطر زلزله و توسعه شهری را می‌توان در چند دسته مفهومی اصلی طبقه‌بندی کرد. دسته نخست، مطالعات متمرکز بر عوامل طبیعی و زمین‌شناسی هستند که به نقش گسل‌ها، نوع خاک، شیب و ارتفاع در وقوع و شدت زلزله پرداخته‌اند. در این زمینه، زارع (۱۳۸۰) با بررسی خطر زمین‌لرزه و ساخت‌وساز در حریم گسل شمال تبریز و احدنژاد روشتی (۱۳۸۸) با مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS در شهر زنجان، به اهمیت فاصله از گسل به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل طبیعی تأکید کرده‌اند. همچنین، ایمانی و پورخسروانی (۱۳۹۶) با تحلیل فضایی پهنه‌های مخاطره‌آمیز شهرستان اردبیل نشان دادند که نواحی مجاور گسل‌های اصلی بیشترین خطرپذیری را دارند. دسته دوم، مطالعات متمرکز بر عوامل کالبدی و ساختمانی هستند که بر کیفیت ابنیه، تراکم ساختمانی، نوع مصالح، قدمت بنا و دانه‌بندی قطعات تأکید دارند. حبیبی و همکاران (۱۳۸۷) با تعیین عوامل سازه‌ای مؤثر در آسیب‌پذیری بافت کهن شهری زنجان با استفاده از منطق فازی وGIS ، نشان دادند که کیفیت ابنیه و نوع سازه‌ها از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در آسیب‌پذیری هستند. علی‌اکبری و میرایی (۱۳۹۴) در آسیب‌شناسی و پهنه‌بندی لرزه‌ای شهرک ولیعصر تبریز با استفاده از مدلIHWP ، تراکم ساختمانی بالا، کمبود فضای سبز و باز، درجه محصوریت بالا و وجود کاربری تجاری را مشخصه‌های اصلی بافت آسیب‌پذیر معرفی کردند. همچنین، پورمحمدی و کرمی (۱۳۹۳) با ترکیب مدل کرنل (KDE) و مدل AHP در ارزیابی خطر زلزله در بافت‌های حاشیه‌نشین و فرسوده مناطق یک و پنج تبریز، بر اهمیت تراکم جمعیت، تراکم ساختمانی، کیفیت ابنیه و نوع مصالح تأکید کردند. دسته سوم، مطالعات با رویکرد مدیریت بحران و تاب‌آوری شهری هستند که به توانایی شهرها برای مقابله، بازیابی و انطباق با مخاطرات طبیعی توجه دارند. رازانی و همکاران (۱۴۰۰) با تبیین ابعاد و مؤلفه‌های الگوی مناسب مدیریت بحران زلزله در بافت‌های فرسوده شهر تهران، بر ضرورت نگاه پیشگیرانه و مدیریت ریسک پیش از بحران تأکید کردند و نشان دادند که در مرحله پیش از بحران، توجه به ابعاد مختلف اجتماعی–فرهنگی، کالبدی–محیطی، اقتصادی، ساختاری–مدیریتی، حقوقی–قانونی و زیرساخت‌ها می‌تواند منجر به کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای تاب‌آوری شود. رجایی و همکاران (۱۴۰۰) در تحلیل فضایی تاب‌آوری شهری در برابر زلزله در منطقه یک تهران، با رویکرد تلفیقی ابعاد عینی و ذهنی، نشان دادند که محلات مختلف از تاب‌آوری متفاوتی برخوردارند و عواملی نظیر کیفیت ساختمان‌ها، تراکم جمعیت و دسترسی به فضاهای باز نقش تعیین‌کننده‌ای در تاب‌آوری ایفا می‌کنند. دسته چهارم، مطالعات تلفیقی با تأکید بر توسعه شهری و کاربری اراضی هستند که به‌تدریج در سال‌های اخیر موردتوجه قرارگرفته‌اند. حسنلو و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی جهش شهری و جهات مستعد توسعه شهر با تأکید بر مخاطره زلزله (مطالعه موردی: شهر زنجان)» با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل‌های AHP و فازی، نشان دادند که

رشد مساحتی شهر زنجان طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ بیش از دویست درصد افزایش‌یافته و این رشد به‌طور قابل‌توجهی به سمت مناطق با خطر زلزله بالا (به‌ویژه جنوب و غرب) پیش رفته است. نعمتی و همکاران (۱۴۰۴) در مطالعه‌ای با عنوان «تحلیل پهنه‌بندی خطر زلزله در چارچوب سیاست‌گذاری توسعه شهری زنجان» با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و منطق فازی، به ارائه چارچوبی سیاستی پرداختند و نتایج نشان داد که معیار کالبدی–ساختمانی با وزن ۴۱٫۸۳ درصد بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری دارد و نواحی جنوبی و غربی شهر زنجان به‌عنوان مناطق با خطر بالا شناسایی شدند. همچنین، روستایی و همکاران (۱۴۰۴) با کاربرد الگوریتم KNN در بهینه‌سازی کاربری اراضی شهری با تأکید بر خطر زلزله در شهر سنندج، نشان دادند که پهنه‌های بهینه برای توسعه شهری در مناطق جنوبی و شرقی شهر قرار دارند و حدود ۳۲ درصد از مساحت شهر در وضعیت بهینه قرارگرفته است.

تحلیل نقاط قوت و ضعف این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های پیشین به شناسایی معیارهای کلیدی مؤثر در آسیب‌پذیری و توسعه روش‌های تحلیلی متنوع پرداخته‌اند، اما نقاط ضعف قابل‌توجهی نیز در آن‌ها وجود دارد: (۱) غالب پژوهش‌ها به‌طور مجزا به عوامل طبیعی یا کالبدی پرداخته‌اند و رویکردی یکپارچه که هر دو دسته عوامل را هم‌زمان با الگوی توسعه شهری موردسنجش قرار دهد، نادر است. (۲) بیشتر مطالعات به تحلیل وضعیت موجود اکتفا کرده و کمتر به ارائه راهکارهای سیاستی برای هدایت توسعه آینده پرداخته‌اند. (۳) پژوهش‌های محدودی به تحلیل جهش شهری در ارتباط با پهنه‌های خطر در یک بازه زمانی بلندمدت توجه داشته‌اند و بیشتر مطالعات، مقطعی هستند. (۴) مطالعات انجام‌شده در شهر زنجان عمدتاً به ارزیابی آسیب‌پذیری یا تحلیل لرزه‌خیزی پرداخته‌اند و مطالعه جامعی که تلفیقی از پهنه‌بندی خطر، تحلیل توسعه شهری و ارائه چارچوب سیاستی باشد، در این شهر انجام‌نشده است. (۵) در اکثر پژوهش‌ها، ارتباط میان الگوی رشد و جهش شهری با پهنه‌های خطر زلزله به‌صورت سیستماتیک و با استفاده از مدل‌های ترکیبی بررسی نشده است. بر این اساس، مهم‌ترین شکاف دانشی موجود، فقدان مطالعه‌ای است که بتواند با رویکردی تلفیقی و با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به اولویت‌بندی جامع معیارها، تحلیل جهش شهری در ارتباط با پهنه‌های خطر، و ارائه چارچوبی برای سیاست‌گذاری توسعه شهری در زنجان بپردازد.

اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش از چند جنبه حیاتی قابل تبیین است. از منظر علمی، این پژوهش با تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP وFUZZY) با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل جهش شهری در بازه زمانی بلندمدت، چارچوبی تحلیلی برای سنجش هم‌زمان عوامل طبیعی، کالبدی و توسعه‌ای در پهنه‌بندی خطر زلزله ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر شهرهای زلزله‌خیز ایران به کار رود. این پژوهش به غنای ادبیات موضوع در حوزه برنامه‌ریزی شهری و مدیریت مخاطرات طبیعی با تأکید بر ارتباط متقابل توسعه شهری و خطرپذیری لرزه‌ای می‌افزاید و به‌ویژه به شکاف موجود در زمینه تحلیل فضایی جهش شهری در ارتباط با پهنه‌بندی خطر زلزله پاسخ می‌دهد. از منظر کاربردی و مدیریتی، نتایج این پژوهش می‌تواند مستقیماً در فرایندهای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری توسعه شهری به کار گرفته شود. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله تولیدشده در این پژوهش، ابزاری عملیاتی برای مدیران شهری، برنامه‌ریزان و مسئولان حوزه مسکن و شهرسازی فراهم می‌آورد تا بتوانند توسعه آینده شهر را به سمت پهنه‌های کم‌خطر هدایت کنند، ضوابط ساخت‌وساز را بر اساس میزان خطر در هر پهنه تدوین نمایند، و اولویت‌های مقاوم‌سازی و نوسازی بافت‌های فرسوده را تعیین کنند. به عبارتی، این پژوهش پلی است میان دانش علمی و اقدام عملی در حوزه مدیریت بحران و برنامه‌ریزی شهری (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴؛ حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). از منظر اجتماعی و اقتصادی، با توجه به اینکه بیش از نیمی از جمعیت شهر زنجان در پهنه‌های با خطر زلزله متوسط تا بالا سکونت دارند و اکثر کاربری‌های حیاتی و تأسیساتی شهر در این مناطق قرارگرفته‌اند، بی‌توجهی به این مسئله می‌تواند پیامدهای

جبران‌ناپذیری در ابعاد انسانی، اقتصادی و اجتماعی به دنبال داشته باشد (قنبری و همکاران، ۱۳۹۲). وقوع یک زلزله با شدت متوسط در زنجان می‌تواند هزاران کشته و مجروح، صدها هزار بی‌خانمان، تخریب گسترده زیرساخت‌ها و خسارت‌های مالی سنگین به همراه داشته باشد، چنان‌که زلزله سال ۱۳۶۹ رودبار–منجیل با قدرت ۷٫۴ ریشتر در شمال استان، بیش از ۴۰ هزار کشته برجای گذاشت. از منظر محیط‌زیستی، توسعه شهری در حریم گسل‌ها و بر روی زمین‌های آبرفتی جوان، نه‌تنها خطرات لرزه‌ای را تشدید می‌کند، بلکه می‌تواند منجر به مخاطرات ثانویه نظیر روانگرایی خاک، نشست زمین و زمین‌لغزش شود که ابعاد فاجعه را گسترش می‌دهد. شواهد نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، اراضی کشاورزی حاشیه شهر به‌سرعت به کاربری مسکونی و تجاری تبدیل‌شده‌اند که این امر ضمن کاهش فضای سبز و باز شهری، بر شدت آسیب‌پذیری در زمان بحران می‌افزاید با توجه به قرارگیری ۴۴ درصد از مساحت استان زنجان در پهنه با خطر بالای زلزله، رشد سریع شهرنشینی به سمت مناطق پرخطر، وجود بافت‌های فرسوده با کیفیت پایین سازه‌ها (به‌گونه‌ای که حدود ۶۹ درصد بناها در بخش مرکزی شهر در رده آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند)، و فقدان یک چارچوب یکپارچه برای هدایت توسعه شهری بر اساس مخاطرات لرزه‌ای، مداخله فوری و علمی در این حوزه اجتناب‌ناپذیر است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴؛ ضرغامی، ۲۰۱۷). فقدان چنین چارچوبی تاکنون منجر به تداوم توسعه در پهنه‌های پرخطر، افزایش آسیب‌پذیری کالبدی و تشدید خطرات جانی و مالی شده است و هرگونه تأخیر در این زمینه می‌تواند هزینه‌های فاجعه‌باری را به همراه داشته باشد.

بر این مبنا، هدف اصلی پژوهش حاضر، پهنه‌بندی خطر زلزله شهر زنجان با تأکید بر مؤلفه‌های توسعه شهری و ارائه چارچوبی تحلیلی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری فضایی است. در راستای تحقق این هدف، پژوهش حاضر در پی پاسخگویی به دو سؤال اساسی است: نخست، مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر پهنه‌بندی خطر زلزله در شهر زنجان با تأکید بر توسعه شهری کدام‌اند و سهم نسبی هر یک در شکل‌گیری الگوی فضایی آسیب‌پذیری چگونه است؟ دوم، تلفیق مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای، منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی چه تصویری از توزیع فضایی پهنه‌های خطر زلزله در شهر زنجان ارائه می‌دهد و نتایج حاصل چه دلالت‌هایی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی توسعه شهری دارد؟

مبانی نظری

نگاه به زلزله در طول چند دهه اخیر دستخوش تحولی اساسی شده است. در رویکردهای سنتی، زلزله عمدتاً به‌عنوان یک «حادثه» یا «بحران» ناگهانی تلقی می‌شد که باید پس از وقوع، نسبت به مدیریت پیامدهای آن اقدام کرد. این نگاه که ریشه در رویکردهای «بحران محور» و «واکنش محور» دارد، بر مجموعه اقدامات پس از وقوع سانحه متمرکز بوده و با نگرشی منفی به مدیریت بحران، رویکردی «بالا به پایین» و عدم توجه به مشارکت مردمی همراه است (ربیعی و حسینی، ۱۳۹۲). پیامد این رویکرد، افزایش هزینه‌ها، عدم آمادگی‌های لازم و اجرای برنامه‌های غیرضروری بوده است. بااین‌حال، تجربیات تلخ زلزله‌های مخرب در دهه‌های اخیر نشان داده است که این رویکرد نه‌تنها کارایی لازم را ندارد، بلکه با افزایش هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی، بر شدت آسیب‌پذیری جوامع شهری می‌افزاید. در مقابل، رویکردهای نوین بر این اصل تأکید دارند که مدیریت مخاطرات طبیعی، به‌ویژه زلزله، باید به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایند توسعه شهری موردتوجه قرار گیرد. به عبارتی، کاهش خطر زلزله نباید صرفاً به اقدامات اضطراری و واکنش پس از بحران محدود شود، بلکه باید در تمامی مراحل برنامه‌ریزی، طراحی و توسعه شهرها نهادینه گردد. این تحول پارادایمی، از «مدیریت حادثه» به سمت «پیش‌گیری از سوانح و آمادگی در برابر آن‌ها» حرکت کرده است و مفهوم شهرها به‌عنوان

سیستم‌های پیچیده و پویا که باید توانایی مقابله، بازیابی و انطباق با مخاطرات طبیعی را داشته باشند، در ادبیات معاصر با عنوان تاب‌آوری شهری شناخته می‌شود (رجایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ برنافر و همکاران، ۱۴۰۵؛ رازانی و همکاران، ۱۴۰۰).

رابطه میان توسعه شهری و آسیب‌پذیری در برابر زلزله، رابطه‌ای دوطرفه و پیچیده است. از یک‌سو، توسعه شهری بی‌برنامه می‌تواند به‌طور مستقیم آسیب‌پذیری را افزایش دهد. گسترش فیزیکی شهر به سمت پهنه‌های پرخطر (نزدیک به گسل‌ها، بر روی خاک‌های سست و آبرفتی، یا در مناطق با شیب زیاد)، افزایش تراکم جمعیت و ساختمانی در بافت‌های فرسوده، تغییر کاربری اراضی از فضاهای باز و سبز به کاربری‌های متراکم مسکونی و تجاری، و توسعه زیرساخت‌ها در مناطق ناپایدار، همگی عواملی هستند که خطرپذیری شهر را در برابر زلزله به‌شدت افزایش می‌دهند (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). در ایران، بسیاری از شهرها از جمله زنجان، رشد فیزیکی خود را بدون توجه به اصول مکان‌یابی علمی و ظرفیت‌های زمین‌شناسی انجام داده‌اند و همین امر، آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر زلزله دوچندان کرده است (پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳؛ علی‌اکبری و میرایی، ۱۳۹۴). از سوی دیگر، توسعه شهری پایدار و آگاهانه می‌تواند به‌عنوان مؤثرترین ابزار برای کاهش خطرپذیری لرزه‌ای عمل کند. برنامه‌ریزی کاربری اراضی شهری، به‌عنوان هسته مرکزی برنامه‌ریزی شهری، می‌تواند با هدایت توسعه به سمت پهنه‌های کم‌خطر، جلوگیری از ساخت‌وساز در حریم گسل‌ها، ایجاد فضاهای باز و سبز چندمنظوره برای اسکان اضطراری، توزیع متوازن کاربری‌ها و کاهش تراکم در بافت‌های فرسوده، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش آسیب‌پذیری ایفا کند (روستایی و همکاران، ۱۴۰۴؛ Motamed et al., 2020). به عبارتی، توسعه شهری نه‌فقط یک عامل تشدیدکننده خطر، بلکه مهم‌ترین ابزار کاهش خطر محسوب می‌شود و این دوگانگی، اهمیت بنیادین پژوهش‌های تلفیقی در این حوزه را آشکار می‌سازد.

در این چارچوب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی حساس به خطر[1] به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای نظری در حوزه تلفیق توسعه شهری و کاهش خطر زلزله مطرح‌شده است. این رویکرد بر این اصل استوار است که پایدارترین راه‌کار برای مقابله با خطرات طبیعی، تلفیق اقدامات کاهش خطر در فرایندهای برنامه‌ریزی کاربری اراضی است (Motamed et al., 2020; Risk-Sensitive Land Use Planning, 2020). RSLUP به‌عنوان یک رویکرد جامع و پیشگیرانه، در صدد است تا با شناسایی پهنه‌های پرخطر، تعیین کاربری‌های مناسب برای هر پهنه، تدوین ضوابط خاص ساخت‌وساز در مناطق مختلف، و هدایت توسعه به سمت پهنه‌های ایمن، از شکل‌گیری خطرات جدید جلوگیری کرده و خطرات موجود را کاهش دهد. در این چارچوب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی دیگر صرفاً به‌عنوان ابزاری برای تخصیص فضا به فعالیت‌های مختلف شهری در شرایط عادی دیده نمی‌شود، بلکه به‌عنوان ابزاری راهبردی برای مدیریت خطر در شرایط بحران نیز موردتوجه قرار می‌گیرد. مؤلفه‌های کلیدی این رویکرد شامل شناسایی و پهنه‌بندی خطر به‌عنوان اولین و مهم‌ترین گام که مبنای تمامی تصمیم‌گیری‌های بعدی است (قنبری و همکاران، ۱۳۹۲؛ تیری و کرمی، ۱۳۹۵)، مکان‌یابی بهینه کاربری‌ها بر اساس میزان خطر در هر پهنه به‌گونه‌ای که کاربری‌های حساس و پرجمعیت در پهنه‌های کم‌خطر و کاربری‌های کم‌اهمیت‌تر در پهنه‌های پرخطر استقرار یابند (روستایی و همکاران، ۱۴۰۴)، تدوین ضوابط خاص ساخت‌وساز برای هر پهنه بر اساس میزان خطر از جمله محدودیت‌های تراکم، ارتفاع، نوع مصالح و سیستم سازه‌ای (رازانی و همکاران، ۱۴۰۰)، ایجاد و حفاظت از فضاهای باز و سبز به‌عنوان مکان‌های امن برای اسکان اضطراری و تسهیل عملیات امداد و نجات (علی‌اکبری و میرایی، ۱۳۹۴؛ پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳)، و کنترل و هدایت رشد شهری

1. Risk-Sensitive Land Use Planning

به سمت پهنه‌های با خطر کمتر و جلوگیری از گسترش بی‌رویه در پهنه‌های پرخطر (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴) می‌باشد.

تاب‌آوری شهری به‌عنوان ظرفیت یک سیستم شهری برای حفظ یا بازگشت سریع به عملکردهای مطلوب در مواجهه با آشفتگی، یکی از مفاهیم کلیدی در ادبیات معاصر مدیریت مخاطرات طبیعی است که فراتر از رویکردهای سنتی که صرفاً بر مقاومت سازه‌ها تأکید داشتند، به ابعاد گسترده‌تری از جمله انعطاف‌پذیری، افزونگی، سازگاری و یادگیری توجه دارد (رجایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ برنافر و همکاران، ۱۴۰۵؛Meerow et al., 2016). در این چارچوب، توسعه شهری نه‌تنها به‌عنوان عاملی در کاهش یا افزایش آسیب‌پذیری، بلکه به‌عنوان موتور اصلی شکل‌دهی به تاب‌آوری شهرها در نظر گرفته می‌شود. از منظر سیستمیک، توسعه شهری بر تمامی ابعاد تاب‌آوری تأثیر می‌گذارد: بعد کالبدی (کیفیت و مقاومت ساختمان‌ها، تراکم، شبکه معابر، فضاهای باز)، بعد اجتماعی (تراکم جمعیت، سرمایه اجتماعی، آگاهی عمومی، مشارکت)، بعد اقتصادی (تنوع اقتصادی، امنیت شغلی، پایداری معیشت)، بعد نهادی (ساختار مدیریت شهری، قوانین و مقررات، هماهنگی بین بخشی) و بعد زیرساختی (شبکه‌های آب، برق، گاز، ارتباطات و حمل‌ونقل) (رازانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رجایی و همکاران، ۱۴۰۰). به عبارتی، تاب‌آوری شهری محصول نهایی نحوه توسعه شهری است و هرگونه سیاست‌گذاری برای ارتقای تاب‌آوری، ناگزیر باید از مسیر اصلاح الگوی توسعه شهری عبور کند. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که شهرهایی که توسعه خود را بر اساس اصول تاب‌آوری برنامه‌ریزی کرده‌اند، در هنگام وقوع زلزله عملکرد بسیار بهتری داشته‌اند؛ برای مثال، ایجاد فضاهای باز چندمنظوره، طراحی شبکه معابر با دسترسی‌های متعدد و استاندارد، توزیع متوازن کاربری‌های خدماتی و امدادی، و جلوگیری از ساخت‌وساز در حریم گسل‌ها، از جمله اقداماتی هستند که می‌توانند تاب‌آوری شهری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند (علی‌اکبری و میرایی، ۱۳۹۴؛ پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳). برعکس، توسعه فشرده و بی‌برنامه در بافت‌های فرسوده، افزایش تراکم بدون توجه به ظرفیت معابر و زیرساخت‌ها، و تغییر کاربری فضاهای باز به کاربری‌های متراکم، تاب‌آوری را به‌شدت کاهش می‌دهند (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴).

با توجه به ماهیت چندبعدی و پیچیده مسئله تلفیق توسعه شهری و کاهش خطر زلزله، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) در کنار سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی(GIS) ، به‌عنوان رویکردی استاندارد و کارآمد در ادبیات موضوع مطرح‌شده است (Erden & Kararman, 2012; Nyimbili et al., 2018) این مدل‌ها امکان وزن دهی به معیارهای مختلف (طبیعی، کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و مدیریتی)، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی متنوع، و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی را فراهم می‌آورند (قنبری و همکاران، ۱۳۹۲؛ تیری و کرمی، ۱۳۹۵). در میان مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و توانایی در ترکیب معیارهای کمی و کیفی، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در پهنه‌بندی خطر زلزله و بهینه‌سازی کاربری اراضی شهری است (زارع، ۱۳۸۰؛ حبیبی و همکاران، ۱۳۸۷). همچنین، منطق فازی (FUZZY) به دلیل توانایی در مدیریت عدم قطعیت و ابهام ذاتی در داده‌های مکانی و نظرات کارشناسی، به‌عنوان رویکردی مکمل یا جایگزین برای AHP مورداستفاده قرار می‌گیرد (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). تلفیق این دو روش (AHP-FUZZY) امکان بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای هر دو رویکرد را فراهم می‌آورد و دقت و اعتمادپذیری نتایج را افزایش می‌دهد (قنبری و همکاران، ۱۳۹۲). علاوه بر این، در سال‌های اخیر، مدل‌های نوین‌تری مانند فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) که امکان در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل میان معیارها را فراهم می‌آورد (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴)، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایگی (KNN) که به‌عنوان یکی از ۱۰ روش برتر داده‌کاوی، دقت بالایی در طبقه‌بندی و بهینه‌سازی دارد (روستایی

و همکاران، ۱۴۰۴)، و مدل‌های معادلات ساختاری (SEM) که امکان تحلیل روابط علی میان ابعاد مختلف تاب‌آوری را فراهم می‌آورند (برنافر و همکاران، ۱۴۰۵)، نیز در پژوهش‌های مرتبط با توسعه شهری و خطر زلزله به کار گرفته‌شده‌اند.

شهر زنجان، به‌عنوان مورد مطالعه این پژوهش، نمونه‌ای بارز از شهری است که توسعه آن بدون توجه کافی به مخاطرات لرزه‌ای انجام‌شده است. رشد مساحتی این شهر طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ بیش از دویست درصد افزایش‌یافته و این رشد به‌طور قابل‌توجهی به سمت مناطق با خطر زلزله بالا (به‌ویژه جنوب و غرب) پیش رفته است (حسنلو و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین، معیار کالبدی–ساختمانی با وزن ۴۱٫۸۳ درصد، بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری شهر دارد که نشان‌دهنده نقش کلیدی کیفیت ابنیه، نوع سازه و وضعیت بافت‌های فرسوده در میزان خطرپذیری است (نعمتی و همکاران، ۱۴۰۴). این وضعیت، ضرورت به‌کارگیری چارچوب نظری مبتنی بر تلفیق توسعه شهری و کاهش خطر را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. بر اساس مبانی نظری ارائه‌شده، توسعه شهری در زنجان باید به‌عنوان متغیر کلیدی در سیاست‌گذاری کاهش خطر زلزله موردتوجه قرار گیرد و هرگونه برنامه‌ریزی برای کاهش آسیب‌پذیری، ناگزیر باید از مسیر اصلاح الگوی توسعه شهری عبور کند. این امر مستلزم بازنگری اساسی در طرح‌های جامع و تفصیلی شهر، تدوین ضوابط خاص ساخت‌وساز بر اساس پهنه‌بندی خطر، هدایت توسعه به سمت پهنه‌های کم‌خطر، مقاوم‌سازی بافت‌های فرسوده، و ایجاد فضاهای باز و سبز چندمنظوره است (رازانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ روستایی و همکاران، ۱۴۰۴).

بر اساس مبانی نظری مطرح‌شده، مدل مفهومی پژوهش در سه محور قابل ترسیم است :محور اول شامل عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری است که خود به سه دسته عوامل طبیعی (فاصله از گسل، نوع خاک، شیب، ارتفاع)، عوامل کالبدی–ساختمانی (کیفیت ابنیه، نوع سازه، تراکم ساختمانی، قدمت بنا، کاربری اراضی) و عوامل اجتماعی–اقتصادی (تراکم جمعیت، دسترسی به مراکز امدادی، مشارکت مردمی، آگاهی عمومی) تقسیم می‌شوند .محور دوم، الگوی توسعه شهری به‌عنوان متغیر میانجی است که شامل جهت‌گیری رشد، تغییرات کاربری اراضی، تراکم سازی و گسترش فیزیکی شهر می‌شود و می‌تواند شدت تأثیر عوامل محور اول بر آسیب‌پذیری را تشدید یا تعدیل کند؛ به عبارتی توسعه شهری می‌تواند با هدایت به سمت پهنه‌های کم‌خطر (توسعه پایدار) آسیب‌پذیری را کاهش دهد یا با گسترش به سمت پهنه‌های پرخطر (توسعه ناپایدار) آن را تشدید نماید .محور سوم، پیامدها یعنی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شهری در برابر زلزله است که ترکیبی از عوامل فوق، سطح آن را تعیین می‌کند. این مدل مفهومی، مبنای تحلیل‌های فضایی و مدل‌سازی در این پژوهش قرار خواهد گرفت و چارچوبی برای تفسیر نتایج و ارائه توصیه‌های سیاستی فراهم خواهد آورد تا با شناسایی پهنه‌های با درجات مختلف خطر و تاب‌آوری، بتوان گام‌های مؤثری در جهت کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای ایمنی شهر زنجان برداشت (رازانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱؛ پورمحمدی و کرمی، ۱۳۹۳).

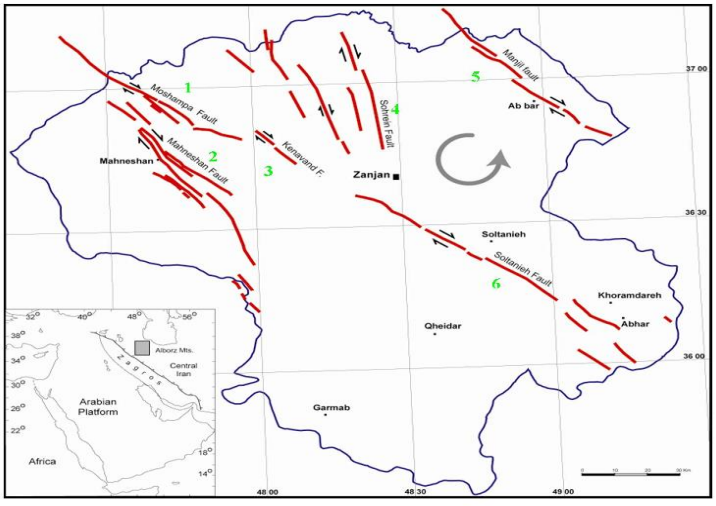
محدوده مورد مطالعه

شهر زنجان، مرکز استان زنجان، یکی از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، اداری، صنعتی و خدماتی شمال غرب ایران است که در دهه‌های اخیر به دلیل رشد جمعیت، توسعه کالبدی و گسترش فعالیت‌های اقتصادی، تحولات فضایی قابل‌توجهی را تجربه کرده است. این شهر در حدود ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و در ارتفاع متوسط حدود ۱۶۳۸ متر از سطح دریا واقع‌شده و بر اساس آخرین سرشماری رسمی، جمعیتی بالغبر نیم میلیون نفر را در خود جای‌داده است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲). موقعیت ارتباطی زنجان در مسیر کریدور تهران–تبریز و قرارگیری در محورهای اصلی حمل‌ونقل کشور، موجب افزایش نقش اقتصادی و عملکرد منطقه‌ای این شهر شده و روند توسعه کالبدی آن را طی سال‌های اخیر تسریع کرده است.

از منظر زمین‌شناسی، شهر زنجان در پهنه‌ای قرارگرفته است که تحت تأثیر فعالیت سامانه‌های گسلی شمال غرب ایران قرار دارد. مهم‌ترین ساختارهای فعال منطقه شامل گسل‌های ماه‌نشان، سلطانیه، سهرین و آب‌بر هستند که در شکل‌گیری ساختار تکتونیکی دشت زنجان نقش اساسی داشته‌اند (ثبوتی و همکاران، ۱۳۸۷). هرچند برخی از این گسل‌ها مستقیماً از محدوده قانونی شهر عبور نمی‌کنند، اما نزدیکی آن‌ها به شهر و سابقه لرزه‌خیزی منطقه، احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب را افزایش داده و زنجان را در زمره شهرهای نیازمند برنامه‌ریزی پیشگیرانه قرار داده است. بر اساس نقشه خطر نسبی زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰)، بخش قابل‌توجهی از محدوده شهر در پهنه با خطر لرزه‌ای متوسط تا زیاد قرار دارد که این موضوع ضرورت ارزیابی فضایی آسیب‌پذیری را دوچندان می‌کند (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۰)

علاوه بر این، تمرکز کاربری‌های مهم شهری نظیر مراکز درمانی، آموزشی، اداری، صنعتی و شبکه‌های حمل‌ونقل در بخش‌های مختلف شهر، اهمیت ارزیابی فضایی خطر زلزله را افزایش می‌دهد؛ زیرا اختلال در عملکرد این کاربری‌ها می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای کل سامانه شهری به همراه داشته باشد. ازاین‌رو، شناخت الگوی توزیع فضایی آسیب‌پذیری نه‌تنها برای کاهش خسارات احتمالی، بلکه برای هدایت توسعه آتی شهر، بازنگری ضوابط ساخت‌وساز، مکان‌یابی کاربری‌های حساس و افزایش تاب‌آوری شهری ضروری است (Koliou et al., 2020؛ Shafapour Tehrany et al., 2023).

بر همین اساس، شهر زنجان به دلیل هم‌زمانی سه ویژگی اساسی شامل قرارگیری در پهنه لرزه‌خیز، توسعه شتابان کالبدی و تمرکز فعالیت‌های جمعیتی و اقتصادی، نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای با رویکرد توسعه شهری محسوب می‌شود. انتخاب این شهر امکان تحلیل هم‌زمان عوامل طبیعی، کالبدی، دسترسی، اقتصادی و خدماتی را فراهم کرده و نتایج پژوهش می‌تواند در بازنگری برنامه‌های توسعه شهری، مدیریت بحران و کاهش ریسک لرزه‌ای مورداستفاده مدیران و برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد.



شکل ۱. گسل‌های فعال در استان زنجان–**منبع:** ثبوتی و همکاران، ۱۳۸۷.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی–تحلیلی است و با رویکرد آمیخته اکتشافی متوالی انجام‌شده است. در این پژوهش، ابتدا با بهره‌گیری از مطالعات اسنادی، مرور منابع علمی و بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی، مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای و توسعه شهری استخراج شد و سپس با استفاده از نظر

خبرگان، شاخص‌های شناسایی‌شده پالایش و نهایی گردید. در مرحله کیفی، نقش اصلی پژوهش، شناسایی و تبیین معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر پهنه‌بندی خطر زلزله بود و در مرحله کمی، این شاخص‌ها به متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری تبدیل‌شده و وزن دهی، استانداردسازی و تحلیل فضایی آن‌ها انجام شد. بدین ترتیب، نقطه ادغام دو بخش کیفی و کمی در مرحله تشکیل مدل تصمیم‌گیری و تحلیل فضایی قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که خروجی بخش کیفی، مبنای طراحی مدل کمی و تولید نقشه نهایی پهنه‌بندی شد.

جامعه آماری بخش تخصصی پژوهش را خبرگان حوزه‌های شهرسازی، برنامه‌ریزی شهری، مدیریت بحران، زمین‌شناسی، مهندسی عمران و سامانه اطلاعات جغرافیایی تشکیل دادند. نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند انجام شد و ۲۰ نفر از متخصصان دارای حداقل مدرک کارشناسی ارشد، سابقه علمی یا اجرایی مرتبط و آشنایی کافی با مباحث برنامه‌ریزی شهری و مخاطرات طبیعی در پژوهش مشارکت کردند. پرسشنامه‌های مقایسات زوجی به‌صورت حضوری و الکترونیکی در اختیار خبرگان قرار گرفت و پس از جمع‌آوری، پایایی ابزار با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ ارزیابی شد که مقدار ۰/۸۰۲ به دست آمد و بیانگر پایایی مناسب پرسشنامه بود.

پس از استخراج شاخص‌ها، تعداد ۲۱ زیر معیار در قالب پنج معیار اصلی شامل عوامل طبیعی، کالبدی–ساختمانی، دسترسی، اقتصادی–اجتماعی و خدمات شهری سازمان‌دهی شد. به‌منظور تعیین اهمیت نسبی و روابط متقابل میان این معیارها، از مدل فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده شد؛ زیرا برخلاف روش سلسله‌مراتبی AHP، این مدل امکان تحلیل وابستگی و بازخورد میان معیارها را فراهم می‌کند (Saaty, 2005). ماتریس‌های مقایسات زوجی بر اساس مقیاس ۹ درجه ساعتی تکمیل و پس از محاسبه بردارهای ویژه، سوپر ماتریس اولیه، سوپر ماتریس وزنی و سوپر ماتریس حد، وزن نهایی معیارها استخراج شد. همچنین نرخ ناسازگاری تمامی ماتریس‌ها کمتر از ۱۰/۰ بود که نشان‌دهنده سازگاری مطلوب قضاوت خبرگان است.

ازآنجاکه بسیاری از شاخص‌های مکانی دارای مرزهای قطعی نبوده و با عدم قطعیت همراه هستند، برای استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی از منطق فازی استفاده شد. متناسب با ماهیت هر زیر معیار، توابع عضویت خطی و S شکل به کار گرفته شد؛ به‌گونه‌ای که برای متغیرهایی مانند فاصله از گسل، فاصله کمتر از ۵۰۰ متر به‌عنوان بیشترین درجه خطر و فاصله بیش از ۳۰۰۰ متر به‌عنوان کمترین درجه خطر در نظر گرفته شد و برای متغیرهایی نظیر شیب نیز مقادیر کمتر از ۵ درصد دارای مطلوبیت بیشتر و مقادیر بیش از ۲۰ درصد دارای مطلوبیت کمتر فرض شد. سایر زیرمعیارها نیز بر اساس ماهیت اثرگذاری آن‌ها و با استناد به ادبیات پژوهش و نظر خبرگان استانداردسازی شدند تا تمامی لایه‌ها در مقیاس یکسان و قابل‌مقایسه قرار گیرند.

در ادامه، وزن‌های حاصل از مدل ANP به لایه‌های استانداردشده اختصاص یافت و تمامی داده‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از روش Weighted Overlay تلفیق شدند. به‌کارگیری این روش امکان ترکیب هم‌زمان وزن معیارها با درجات عضویت فازی را فراهم ساخت و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زلزله شهر زنجان در پنج طبقه بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تولید شد. طبقه‌بندی نهایی با استفاده از روش Natural Breaks (Jenks) انجام گرفت تا بیشترین تمایز میان پهنه‌های مختلف حاصل شود. در پایان نیز نتایج حاصل از پهنه‌بندی با ویژگی‌های کالبدی شهر، کیفیت ابنیه، تراکم ساختمانی، وضعیت شبکه دسترسی و توزیع فضایی کاربری‌های شهری تطبیق داده شد تا میزان انطباق الگوی مکانی به‌دست‌آمده با شرایط واقعی شهر مورد ارزیابی قرار گیرد.

این فرآیند نشان می‌دهد که پژوهش حاضر از یک زنجیره تحلیلی منسجم شامل شناسایی شاخص‌ها، تأیید خبرگان، وزن دهی شبکه‌ای، استانداردسازی فازی، تلفیق فضایی در GIS و تولید نقشه پهنه‌بندی خطر بهره گرفته است و بدین ترتیب ارتباط منطقی میان داده‌های کیفی، تحلیل‌های کمی و نتایج نهایی برقرار شده است.

جدول ۱. شاخص مورد بررسی پژوهش

معیار	زیرمعیارها (نمایه)
کالبدی-ساختمانی(A)	مصالح نما (A1)، تعداد طبقات (A2)، کیفیت بنا (A3)، عمر بنا (A4)، تراکم ساختمان (A5)، مصالح اسکلت(A6) ، کاربری اراضی (A7)، پل (A8)، مساحت قطعات (A9)، سطح اشغال (A10)، ارتفاع (A11)
فاصله از مراکز درمانی و امدادی(B)	فاصله از مراکز درمانی (B1)، فاصله از مراکز آتش‌نشانی (B2)، فاصله از مراکز انتظامی (B3)
طبیعی(C)	فاصله از گسل (C1)، شیب (C2)، فاصله از مسیل و رودخانه (C3)
دسترسی و معابر(D)	فضای باز شهری (D1)، عرض معبر (D2)
جمعیتی(E)	تراکم جمعیتی ناخالص (E1)، تراکم جمعیتی خالص (E2)

یافته‌ها

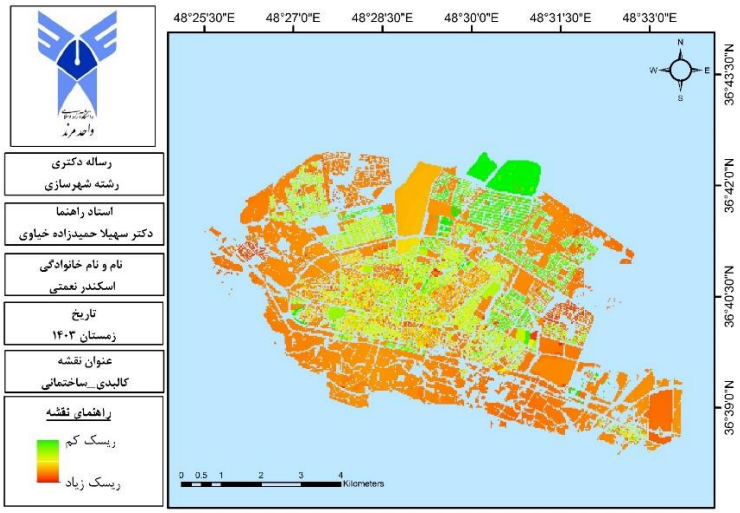
پهنه‌بندی شهر زنجان بر اساس معیار کالبدی-ساختمانی

نتایج حاصل از مدل ANP نشان داد که معیار کالبدی–ساختمانی با وزن ۸۳۹/۴۱ درصد، مهم‌ترین معیار مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان است. این نتیجه بیانگر آن است که ویژگی‌های کالبدی محیط ساخته‌شده، نسبت به سایر معیارهای موردبررسی، سهم بیشتری در شکل‌گیری الگوی فضایی خطر زلزله دارند. بر همین اساس، نقشه پهنه‌بندی این معیار (شکل ۲) بیانگر آن است که توزیع آسیب‌پذیری کالبدی در سطح شهر یکنواخت نیست و شدت آن در نواحی مختلف تفاوت محسوسی دارد.

بررسی نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های دارای تراکم ساختمانی بیشتر، ساختمان‌های قدیمی‌تر و شبکه معابر محدود، نسبت به سایر نواحی از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند. این وضعیت به‌ویژه در بخش‌هایی از بافت‌های توسعه‌یافته و همچنین محدوده‌هایی که کیفیت ابنیه، نوع مصالح ساختمانی و الگوی استقرار ساختمان‌ها با ضوابط لرزه‌ای انطباق کمتری دارند، آشکارتر است. در مقابل، نواحی برخوردار از ساخت‌وسازهای جدیدتر، رعایت ضوابط فنی ساختمان و شبکه دسترسی مناسب، وضعیت مطلوب‌تری از نظر ایمنی کالبدی دارند. تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری کالبدی صرفاً ناشی از قدمت ساختمان‌ها نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش چندین مؤلفه از جمله کیفیت مصالح، تراکم ساختمانی، نسبت سطح اشغال، تعداد طبقات، عرض معابر و میزان دسترسی به فضاهای باز شهری است .بنابراین، افزایش تراکم ساختمانی بدون ارتقای کیفیت ساخت و رعایت ضوابط فنی، می‌تواند میزان خطرپذیری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، نتایج این معیار نشان می‌دهد که الگوی توسعه کالبدی شهر زنجان در برخی نواحی با اصول توسعه ایمن شهری همخوانی کامل ندارد .تمرکز ساختمان‌های متراکم، محدودیت فضاهای باز، نفوذپذیری پایین شبکه معابر و وجود قطعات ریزدانه در برخی محلات، موجب افزایش آسیب‌پذیری در برابر زلزله شده است. این موضوع بیانگر آن است که کاهش خطر لرزه‌ای تنها از طریق مقاوم‌سازی ساختمان‌ها حاصل نمی‌شود، بلکه مستلزم اصلاح ساختار فضایی شهر، ارتقای کیفیت محیط ساخته‌شده و هدایت توسعه شهری بر مبنای اصول تاب‌آوری شهری است.

درمجموع، یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که معیار کالبدی–ساختمانی نقش پیشران در الگوی آسیب‌پذیری شهر زنجان دارد و به همین دلیل، هرگونه برنامه کاهش خطرپذیری باید در اولویت نخست بر ارتقای کیفیت ساختمان‌ها، بهبود شبکه معابر، افزایش نفوذپذیری شهری، نوسازی بافت‌های فرسوده و کنترل تراکم ساختمانی متمرکز باشد.



نقشه ۲. پهنه‌بندی بر اساس معیار کالبدی–ساختمانی

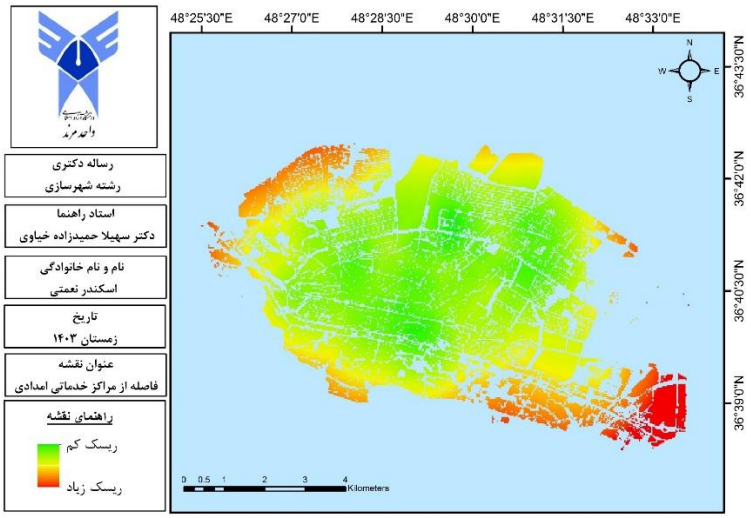
پهنه‌بندی بر اساس معیار دسترسی به مراکز درمانی–امدادی

نتایج حاصل از تحلیل فضایی معیار دسترسی به مراکز درمانی–امدادی نشان می‌دهد که توزیع فضایی خدمات امدادی و درمانی در شهر زنجان از الگوی یکنواختی برخوردار نیست و تفاوت محسوسی میان نواحی مختلف شهر از نظر میزان دسترسی به این خدمات وجود دارد. در این پژوهش، زیرمعیارهای فاصله از بیمارستان‌ها، مراکز درمانی، ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پایگاه‌های اورژانس و مراکز مدیریت بحران پس از استانداردسازی با استفاده از توابع عضویت فازی و اعمال وزن‌های حاصل از مدلANP ، در محیط GIS تلفیق شدند و نقشه نهایی این معیار تهیه گردید.

بررسی نقشه پهنه‌بندی (شکل ۳) نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی شهر، به دلیل تمرکز بیشتر مراکز درمانی و امدادی و همچنین برخورداری از شبکه ارتباطی مناسب‌تر، در طبقات با آسیب‌پذیری کمتر قرارگرفته‌اند. در مقابل، برخی از نواحی پیرامونی و محدوده‌های توسعه‌یافته جدید، به علت فاصله بیشتر از مراکز امدادرسانی و درمانی، در پهنه‌های با آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرارگرفته‌اند. این الگوی فضایی بیانگر آن است که توزیع خدمات امدادی در سطح شهر از تعادل فضایی کامل برخوردار نبوده و دسترسی یکسانی برای تمامی ساکنان فراهم نشده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که فاصله زمانی و مکانی تا مراکز درمانی و امدادی یکی از عوامل مؤثر در کاهش یا افزایش پیامدهای ناشی از زلزله است. هرچه فاصله از این مراکز افزایش یابد، زمان دسترسی نیروهای امدادی و انتقال مصدومان افزایش‌یافته و در نتیجه احتمال تشدید خسارات انسانی و کاهش اثربخشی عملیات مدیریت بحران بیشتر خواهد شد. بنابراین، اگرچه این معیار در وقوع زلزله نقشی ندارد، اما نقش آن در کاهش پیامدهای پس از سانحه و افزایش تاب‌آوری شهری بسیار قابل‌توجه است.

بررسی هم‌زمان این معیار با سایر معیارهای پژوهش نیز نشان می‌دهد که در برخی نواحی، هم‌پوشانی فاصله زیاد از مراکز درمانی با تراکم ساختمانی بالا و کیفیت نامناسب ابنیه، سطح آسیب‌پذیری لرزه‌ای را افزایش داده است. در مقابل، مناطقی که علاوه بر برخورداری از ساختمان‌های مقاوم‌تر، دسترسی مناسب‌تری به مراکز امدادی دارند، از وضعیت

مطلوب‌تری در نقشه نهایی آسیب‌پذیری برخوردار هستند. این موضوع نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان حاصل برهم‌کنش عوامل کالبدی، طبیعی و خدماتی است و هیچ‌یک از این مؤلفه‌ها به‌تنهایی تبیین‌کننده الگوی نهایی خطر نیستند. از منظر توسعه شهری، یافته‌های این معیار بیانگر آن است که توزیع فضایی مراکز درمانی و امدادی نیازمند بازنگری است؛ زیرا تمرکز بخش قابل‌توجهی از این خدمات در برخی نواحی شهر موجب شده است که ساکنان مناطق دورتر در شرایط اضطراری از سطح دسترسی پایین‌تری برخوردار باشند. این وضعیت می‌تواند کارایی نظام مدیریت بحران را در زمان وقوع زلزله کاهش دهد و ضرورت توجه به عدالت فضایی در استقرار کاربری‌های امدادی و درمانی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. درمجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که معیار دسترسی به مراکز درمانی–امدادی یکی از مؤلفه‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان است و تلفیق آن با سایر معیارهای کالبدی، طبیعی، فضایی و اجتماعی، امکان ارائه تصویری جامع‌تر از الگوی خطر و آسیب‌پذیری شهر را فراهم کرده است. ازاین‌رو، توجه هم‌زمان به ارتقای دسترسی فضایی، بهبود توزیع خدمات امدادی و تقویت زیرساخت‌های مدیریت بحران، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری شهری در برابر زلزله خواهد داشت.



شکل ۳. پهنه‌بندی بر اساس معیار دسترسی به مراکز درمانی–امدادی

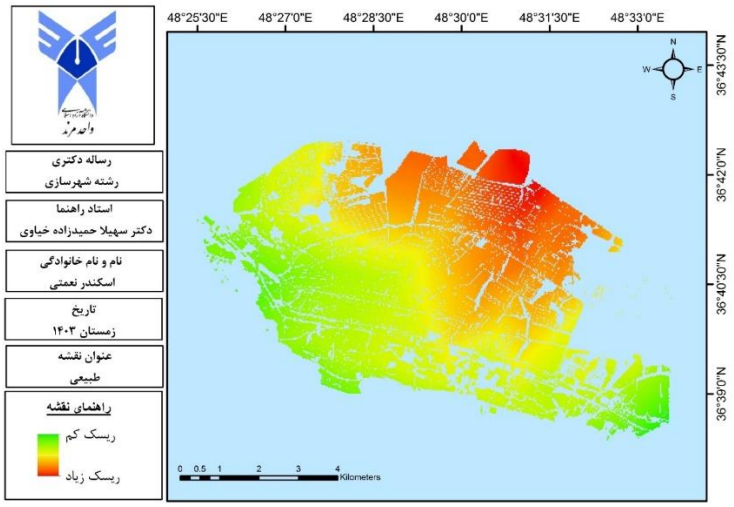
پهنه‌بندی بر اساس معیار طبیعی

پس از تعیین وزن معیارهای اصلی از طریق مدلANP ، معیار طبیعی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادی در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان مورد تحلیل قرار گرفت. این معیار با در نظر گرفتن زیرمعیارهایی نظیر فاصله از گسل‌های فعال، ویژگی‌های زمین‌شناسی، شیب اراضی و شرایط ژئومورفولوژیکی در محیط GIS تهیه و پس از استانداردسازی فازی، در مدل نهایی مورداستفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که اگرچه عوامل طبیعی زمینه اولیه ایجاد مخاطره لرزه‌ای را فراهم می‌کنند، اما شدت آسیب‌پذیری نهایی تنها تابع ویژگی‌های طبیعی نبوده و از برهم‌کنش این عوامل با ساختار کالبدی و نحوه توسعه شهری تأثیر می‌پذیرد.

تحلیل نقشه معیار طبیعی (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت لرزه‌ای در نواحی واقع در مجاورت پهنه‌های گسلی و واحدهای زمین‌شناسی با مقاومت کمتر مشاهده می‌شود. این نواحی به دلیل نزدیکی به ساختارهای فعال زمین‌ساختی، در صورت وقوع زلزله، مستعد تشدید شتاب زمین و افزایش خسارت‌های احتمالی هستند. در مقابل،

بخش‌هایی که از گسل‌های اصلی فاصله بیشتری داشته و بر روی واحدهای زمین‌شناسی پایدارتر قرارگرفته‌اند، از نظر این معیار در وضعیت مناسب‌تری قرار دارند.

بررسی فضایی نتایج نشان می‌دهد که عامل فاصله از گسل در میان زیرمعیارهای طبیعی بیشترین تأثیر را بر الگوی خطر داشته است؛ بااین‌حال، تحلیل هم‌زمان سایر معیارها نشان می‌دهد که نزدیکی به گسل به‌تنهایی بیانگر میزان آسیب‌پذیری نهایی نیست. در برخی نواحی، با وجود قرارگیری در فاصله نسبتاً مناسب از گسل، تراکم ساختمانی بالا، کیفیت نامطلوب ابنیه و کمبود زیرساخت‌های امدادی موجب افزایش سطح آسیب‌پذیری شده است. در مقابل، برخی محدوده‌های نزدیک‌تر به پهنه‌های گسلی، به دلیل کیفیت مناسب ساخت‌وساز و دسترسی بهتر به خدمات شهری، وضعیت مطلوب‌تری نسبت به سایر مناطق دارند. این موضوع بیانگر آن است که خطر طبیعی و آسیب‌پذیری شهری دو مفهوم متفاوت هستند و باید به‌صورت تلفیقی مورد ارزیابی قرار گیرند. از منظر برنامه‌ریزی شهری، نتایج این معیار بیانگر آن است که توسعه فیزیکی شهر در مجاورت پهنه‌های دارای حساسیت زمین‌شناسی بالا، بدون رعایت ضوابط مکان‌یابی و مقررات ساخت‌وساز مقاوم در برابر زلزله، می‌تواند میزان ریسک شهری را افزایش دهد. بنابراین، یافته‌های این بخش ضرورت توجه هم‌زمان به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، پهنه‌بندی خطر و سیاست‌های هدایت توسعه شهری را آشکار می‌سازد. درمجموع، تحلیل معیار طبیعی نشان می‌دهد که هرچند ویژگی‌های زمین‌شناسی و موقعیت گسل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری خطر لرزه‌ای دارند، اما سطح نهایی آسیب‌پذیری شهر زنجان حاصل تعامل میان عوامل طبیعی و عوامل انسان‌ساخت است. ازاین‌رو، برنامه‌ریزی توسعه شهری باید بر مبنای تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی با معیارهای کالبدی، زیرساختی و خدماتی انجام گیرد تا از گسترش ساخت‌وساز در پهنه‌های حساس جلوگیری شود.



شکل ۴. پهنه‌بندی بر اساس معیار طبیعی

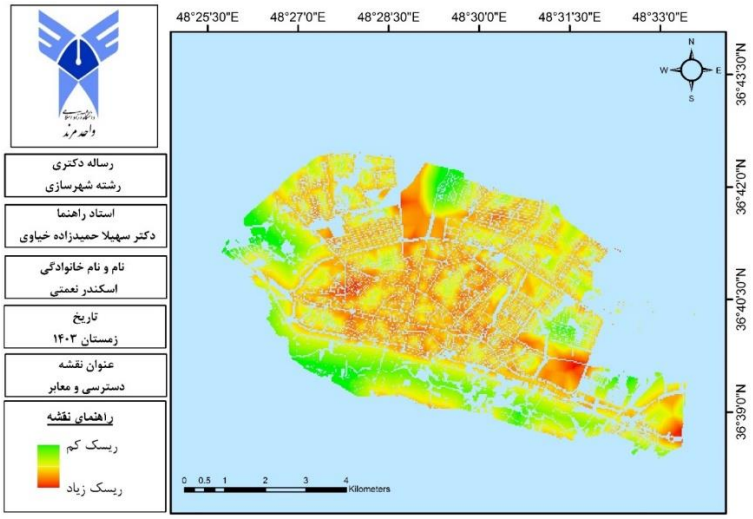
پهنه‌بندی بر اساس معیار فضاهای باز و دسترسی

نتایج حاصل از تحلیل معیار فضاهای باز و دسترسی نشان می‌دهد که این معیار یکی از مؤلفه‌های کلیدی در افزایش تاب‌آوری شهری و کاهش پیامدهای ناشی از زلزله است. در این پژوهش، زیرمعیارهای مرتبط با دسترسی به فضاهای باز، فاصله از پارک‌ها و فضاهای سبز، دسترسی به معابر اصلی، امکان تخلیه اضطراری و قابلیت استقرار نیروهای امدادی پس از استانداردسازی با استفاده از توابع عضویت فازی و اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از مدل ANP، در محیط GIS تلفیق شدند و نقشه پهنه‌بندی این معیار تهیه گردید.

تحلیل نقشه پهنه‌بندی (شکل ۵) نشان می‌دهد که توزیع فضایی فضاهای باز در شهر زنجان یکنواخت نیست و میان محلات مختلف از نظر میزان برخورداری از این فضاها تفاوت محسوسی وجود دارد. بخش‌هایی از شهر که از پارک‌ها، فضاهای سبز و اراضی باز با دسترسی مناسب برخوردارند، در شرایط اضطراری ظرفیت بیشتری برای تخلیه جمعیت، استقرار موقت آسیب‌دیدگان و استقرار تجهیزات امدادی دارند و در نتیجه از منظر این معیار در وضعیت مطلوب‌تری قرارگرفته‌اند. در مقابل، مناطقی که با کمبود فضاهای باز، تراکم بالای ساخت‌وساز و محدودیت دسترسی مواجه هستند، در طبقات با آسیب‌پذیری بیشتر قرارگرفته‌اند.

بررسی فضایی نتایج نشان می‌دهد که کمبود فضاهای باز به‌ویژه در بافت‌های متراکم شهری، یکی از عوامل تشدیدکننده ریسک لرزه‌ای است؛ زیرا در زمان وقوع زلزله، این فضاها علاوه بر ایفای نقش به‌عنوان محل تجمع ایمن شهروندان، امکان اجرای عملیات امداد و نجات، اسکان اضطراری و توزیع خدمات پشتیبانی را فراهم می‌کنند. در مقابل، محدودیت فضاهای باز و انسداد مسیرهای دسترسی می‌تواند موجب افزایش زمان امدادرسانی، اختلال در مدیریت بحران و افزایش خسارات انسانی و اقتصادی شود. تحلیل تلفیقی این معیار با سایر معیارهای پژوهش نیز بیانگر آن است که بیشترین سطح آسیب‌پذیری در نواحی مشاهده می‌شود که کمبود فضاهای باز با تراکم بالای ساختمانی، شبکه معابر کم‌عرض و فاصله بیشتر از مراکز امدادی به‌طور هم‌زمان وجود دارد. این هم‌پوشانی فضایی نشان می‌دهد که ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای باید بر پایه رویکردی چندمعیاره انجام شود؛ زیرا هیچ‌یک از مؤلفه‌های کالبدی، طبیعی یا خدماتی به‌تنهایی قادر به تبیین الگوی نهایی خطر نیستند.

از منظر توسعه شهری، نتایج این معیار بیانگر آن است که توزیع نامتوازن فضاهای باز در برخی محلات شهر زنجان می‌تواند ظرفیت تاب‌آوری شهری را کاهش دهد .در رویکردهای نوین برنامه‌ریزی شهری، فضاهای باز تنها به‌عنوان کاربری‌های تفریحی تلقی نمی‌شوند، بلکه بخشی از زیرساخت‌های حیاتی مدیریت بحران محسوب می‌شوند و نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری شهری ایفا می‌کنند. ازاین‌رو، توجه به عدالت فضایی در توزیع فضاهای باز و حفظ اراضی مناسب برای مدیریت شرایط اضطراری، یکی از الزامات اساسی برنامه‌ریزی توسعه شهری در مناطق لرزه‌خیز به شمار می‌رود. درمجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که معیار فضاهای باز و دسترسی، در کنار معیارهای کالبدی، طبیعی و خدماتی، نقش مؤثری در شکل‌گیری الگوی نهایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان دارد .وجود شبکه‌ای مناسب از فضاهای باز و دسترسی مطلوب به آن‌ها می‌تواند ظرفیت پاسخ‌گویی شهر در شرایط بحران را افزایش داده و زمینه ارتقای تاب‌آوری شهری و کاهش خسارات ناشی از زلزله را فراهم سازد.



شکل ۵. پهنه‌بندی بر اساس معیار فضاهای باز و دسترسی

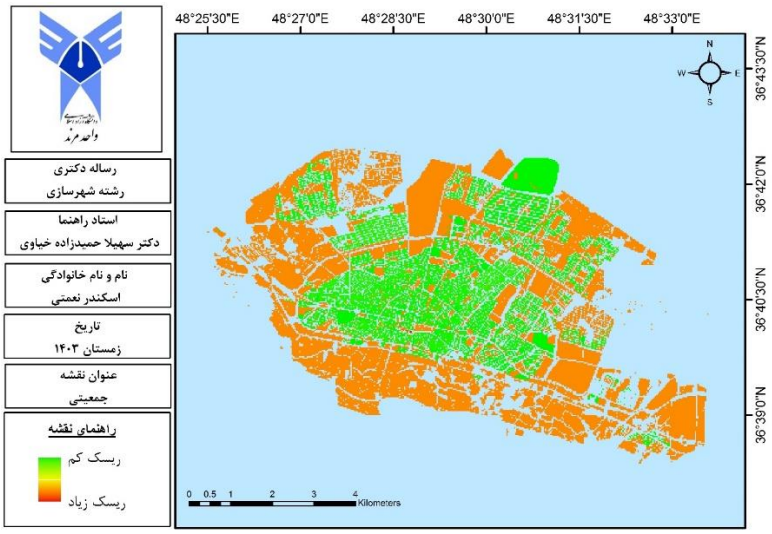
پهنه‌بندی بر اساس معیار جمعیتی

معیار جمعیتی یکی از ابعاد اساسی در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها محسوب می‌شود؛ زیرا شدت پیامدهای زلزله تنها به ویژگی‌های طبیعی و کالبدی وابسته نیست، بلکه به میزان تمرکز جمعیت، ویژگی‌های اجتماعی و ظرفیت پاسخ‌گویی ساکنان نیز بستگی دارد. در پژوهش حاضر، زیرمعیارهای تراکم جمعیت، تراکم خانوار، تراکم ساختمانی، توزیع فضایی جمعیت و شاخص‌های اجتماعی مؤثر بر آسیب‌پذیری پس از استانداردسازی فازی و اعمال وزن‌های حاصل از مدل ANP در محیط GIS تلفیق شدند و نقشه پهنه‌بندی این معیار تهیه گردید.

بررسی نقشه پهنه‌بندی معیار جمعیتی (شکل ۶) نشان می‌دهد که توزیع جمعیت در سطح شهر زنجان از الگوی یکنواختی برخوردار نیست و تمرکز جمعیتی در برخی محلات، سطح آسیب‌پذیری لرزه‌ای را افزایش داده است. نواحی دارای تراکم بالاتر جمعیت، در صورت وقوع زلزله، با احتمال بیشتری در معرض تلفات انسانی، اختلال در فرآیند تخلیه اضطراری و افزایش فشار بر خدمات امدادی قرار می‌گیرند. در مقابل، محدوده‌هایی که از تراکم جمعیتی کمتری برخوردارند، در صورت برابری سایر شرایط، ظرفیت بیشتری برای مدیریت بحران و کاهش پیامدهای سانحه دارند. تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که تراکم جمعیت زمانی به یک عامل تعیین‌کننده در آسیب‌پذیری تبدیل می‌شود که با سایر عوامل خطر، از جمله تراکم ساختمانی، کیفیت پایین ابنیه، کمبود فضاهای باز و محدودیت دسترسی به خدمات امدادی همراه باشد .به‌بیان‌دیگر، تراکم جمعیتی به‌تنهایی تعیین‌کننده میزان خطر نیست، بلکه اثر آن در تعامل با سایر مؤلفه‌های کالبدی و خدماتی آشکار می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده ماهیت چندبعدی آسیب‌پذیری شهری و ضرورت استفاده از رویکردهای تلفیقی در ارزیابی خطر زلزله است.

همپوشانی نتایج این معیار با نقشه نهایی آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از نواحی با آسیب‌پذیری بالا، در محدوده‌هایی قرار دارند که هم‌زمان از تراکم جمعیتی زیاد و کیفیت نامناسب محیط ساخته‌شده برخوردارند. این الگوی فضایی بیانگر آن است که افزایش تمرکز جمعیت در مناطقی که ظرفیت کالبدی و زیرساختی متناسب با آن توسعه‌نیافته است، می‌تواند پیامدهای ناشی از زلزله را به‌طور قابل‌توجهی تشدید کند. از منظر توسعه شهری، نتایج این معیار بیانگر آن است که الگوی توزیع جمعیت در شهر زنجان با ظرفیت زیرساخت‌های شهری در همه نواحی همخوانی کامل ندارد .تمرکز جمعیت در برخی محلات، بدون توسعه متناسب شبکه معابر، فضاهای باز، خدمات درمانی و

زیرساخت‌های مدیریت بحران، سبب افزایش آسیب‌پذیری این نواحی شده است. بنابراین، مدیریت رشد جمعیت و هدایت توسعه شهری بر پایه ظرفیت محیطی و زیرساختی، یکی از پیش‌نیازهای اساسی ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر زلزله به شمار می‌آید. درمجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که معیار جمعیتی یکی از مؤلفه‌های مؤثر در شکل‌گیری الگوی فضایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان است، اما اثر آن در تعامل با سایر معیارهای طبیعی، کالبدی، خدماتی و دسترسی معنا پیدا می‌کند .ازاین‌رو، ارزیابی خطر زلزله در محیط‌های شهری مستلزم توجه هم‌زمان به ویژگی‌های جمعیتی و ساختار فضایی شهر است تا بتوان تصویری جامع از میزان آسیب‌پذیری و ظرفیت تاب‌آوری مناطق مختلف ارائه کرد.



شکل ۶. پهنه‌بندی بر اساس معیار جمعیتی

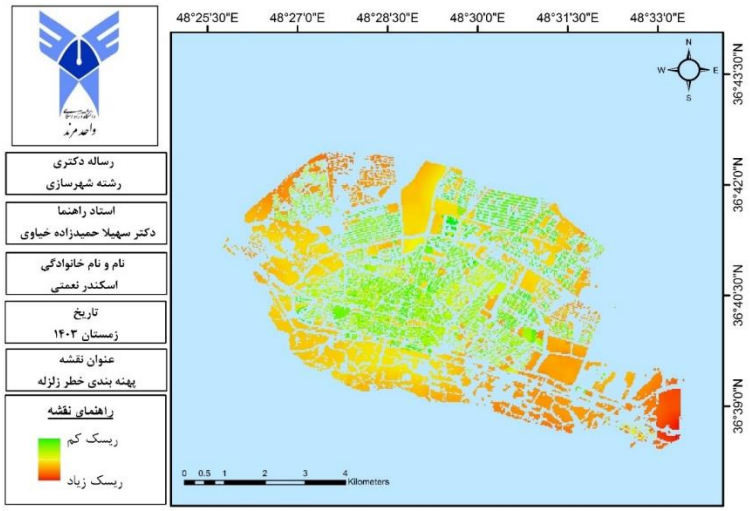
پهنه‌بندی کلی شهر زنجان

پس از تعیین وزن معیارها از طریق مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، استانداردسازی تمامی لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از توابع عضویت فازی و تلفیق آن‌ها در محیط GIS، نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زلزله شهر زنجان تهیه شد. این نقشه بیانگر الگوی فضایی خطر بر پایه تلفیق پنج معیار اصلی شامل معیارهای کالبدی–ساختمانی، طبیعی، دسترسی به مراکز درمانی–امدادی، فضاهای باز و دسترسی و معیارهای جمعیتی است و تصویری جامع از توزیع نسبی آسیب‌پذیری لرزه‌ای در سطح شهر ارائه می‌کند.

بررسی نقشه نهایی (شکل ۷) نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری لرزه‌ای در سطح شهر زنجان دارای توزیع فضایی یکنواختی نیست و شدت خطر در نواحی مختلف شهر تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. الگوی مکانی حاصل از تلفیق لایه‌ها بیانگر آن است که پهنه‌های با خطر بیشتر عمدتاً در مناطقی مشاهده می‌شوند که هم‌زمان از تراکم بالای ساختمانی، کیفیت پایین‌تر ابنیه، محدودیت دسترسی به خدمات امدادی، کمبود فضاهای باز و تراکم جمعیتی بالاتر برخوردار هستند. در مقابل، مناطقی که از شبکه دسترسی مناسب، فضاهای باز کافی، کیفیت بهتر ساختمان‌ها و شرایط مناسب‌تر محیطی بهره‌مند هستند، در طبقات با خطر کمتر قرارگرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که هیچ‌یک از معیارهای موردبررسی به‌تنهایی قادر به تبیین الگوی نهایی خطر نیستند و آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان حاصل برهم‌کنش هم‌زمان عوامل طبیعی، کالبدی، خدماتی و جمعیتی است. به‌ویژه اگرچه قرارگیری در مجاورت پهنه‌های گسلی زمینه ایجاد مخاطره را فراهم می‌کند، اما شدت آسیب‌پذیری نهایی تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های کالبدی شهر، کیفیت ساخت‌وساز، نحوه استقرار

جمعیت و میزان دسترسی به زیرساخت‌های مدیریت بحران قرار دارد. این یافته، ضرورت استفاده از رویکردهای چندمعیاره در ارزیابی خطر زلزله را تأیید می‌کند. تحلیل فضایی نقشه نهایی همچنین بیانگر آن است که الگوی توسعه شهری در برخی بخش‌های زنجان با ظرفیت محیطی و زیرساختی شهر همخوانی کامل ندارد. تمرکز فعالیت‌ها و جمعیت در برخی محلات، همراه با محدودیت فضاهای باز و دسترسی کمتر به خدمات امدادی، موجب افزایش نسبی سطح خطر در این محدوده‌ها شده است. در مقابل، بخش‌هایی که توسعه کالبدی متناسب‌تر، شبکه ارتباطی کارآمدتر و توزیع مناسب‌تر خدمات شهری دارند، از وضعیت مطلوب‌تری در نقشه نهایی برخوردار هستند.

بر این اساس، نقشه نهایی پهنه‌بندی ارائه‌شده بیانگر توزیع نسبی خطر لرزه‌ای در شرایط موجود شهر زنجان است و مبنایی برای اولویت‌بندی مداخلات برنامه‌ریزی شهری و مدیریت ریسک محسوب می‌شود. در این پژوهش، هدف ارائه یک ارزیابی نسبی از میزان آسیب‌پذیری نواحی مختلف شهر بر اساس داده‌ها و شاخص‌های موجود بوده است؛ ازاین‌رو، نتایج به‌دست‌آمده باید در چارچوب دقت داده‌های مکانی و مقیاس مطالعه تفسیر شوند و نه به‌عنوان یک پیش‌بینی قطعی از رفتار لرزه‌ای شهر. این رویکرد، تناقض میان تولید نقشه پهنه‌بندی و محدودیت‌های داده‌ای را برطرف می‌کند و نشان می‌دهد که نقشه نهایی، یک ابزار تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی شهری است، نه ادعای تعیین مطلق خطر در تمام نقاط شهر.



شکل ۷. پهنه‌بندی کلی شهر زنجان

پاسخ به سؤالات پژوهش

مهم‌ترین شاخص‌های اثرگذار بر پهنه‌بندی خطر زلزله شهر زنجان که بتوان با آن به توسعه شهری مطلوب دست‌یافت، کدام است؟

نتایج حاصل از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP) نشان داد که تمامی معیارهای موردبررسی در شکل‌گیری الگوی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان نقش دارند، اما میزان تأثیر آن‌ها یکسان نیست. بر اساس وزن‌های به‌دست‌آمده، معیار کالبدی–ساختمانی بیشترین تأثیر را در تعیین پهنه‌های خطر داشته است؛ موضوعی که نشان می‌دهد کیفیت ساختمان‌ها، تراکم ساخت‌وساز، قدمت ابنیه و ویژگی‌های کالبدی مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده آسیب‌پذیری شهر در برابر زلزله هستند. پس‌ازآن، معیارهای طبیعی، دسترسی به مراکز درمانی–امدادی، فضاهای باز و دسترسی و معیارهای جمعیتی، به ترتیب در شکل‌گیری الگوی نهایی خطر نقش داشته‌اند. تحلیل فضایی نتایج نیز نشان داد که آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان

حاصل برهم‌کنش هم‌زمان عوامل طبیعی، کالبدی، خدماتی و جمعیتی است و هیچ‌یک از این معیارها به‌تنهایی قادر به تبیین الگوی نهایی خطر نیستند .ازاین‌رو، دستیابی به توسعه شهری ایمن مستلزم اتخاذ رویکردی یکپارچه در برنامه‌ریزی شهری است که هم‌زمان به ارتقای کیفیت محیط ساخته‌شده، بهبود دسترسی به خدمات شهری، توزیع مناسب فضاهای باز و مدیریت متوازن استقرار جمعیت توجه داشته باشد.

ارزیابی پهنه‌بندی‌های مختلف خطر زلزله در شهر زنجان با در نظر گرفتن توسعه شهری چه نتایجی را نشان می‌دهد؟

نتایج تلفیق معیارها در محیط GIS نشان داد که الگوی خطر لرزه‌ای در سطح شهر زنجان از توزیع فضایی یکنواختی برخوردار نیست و میزان آسیب‌پذیری در نواحی مختلف شهر تفاوت محسوسی دارد. نقشه نهایی پهنه‌بندی بیانگر آن است که محدوده‌هایی که هم‌زمان از تراکم ساختمانی بیشتر، کیفیت پایین‌تر ابنیه، محدودیت دسترسی به خدمات امدادی، کمبود فضاهای باز و تراکم جمعیتی بالاتر برخوردار هستند، در طبقات با خطر نسبی بیشتر قرارگرفته‌اند. در مقابل، مناطقی که از کیفیت مناسب‌تر ساختمان‌ها، دسترسی بهتر به زیرساخت‌های امدادی، شبکه ارتباطی کارآمد و توزیع متعادل‌تر خدمات شهری بهره‌مند هستند، در پهنه‌های با خطر کمتر قرارگرفته‌اند. بنابراین، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که الگوی توسعه شهری یکی از عوامل اصلی تبیین‌کننده تفاوت فضایی آسیب‌پذیری لرزه‌ای در شهر زنجان است و ارزیابی خطر زلزله زمانی از اعتبار و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود که علاوه بر ویژگی‌های زمین‌شناسی، ابعاد کالبدی، خدماتی، فضایی و جمعیتی نیز به‌صورت هم‌زمان در تحلیل لحاظ شوند. در نتیجه، نقشه نهایی تهیه‌شده می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای اولویت‌بندی اقدامات کاهش خطر، هدایت توسعه شهری و برنامه‌ریزی مدیریت بحران در شهر زنجان مورداستفاده قرار گیرد.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی فضایی خطر زلزله در شهر زنجان حاصل تعامل هم‌زمان عوامل طبیعی، کالبدی، خدماتی و جمعیتی است و هیچ‌یک از این مؤلفه‌ها به‌تنهایی قادر به تبیین میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر نیستند. اگرچه قرارگیری شهر در پهنه‌های لرزه‌خیز و مجاورت با ساختارهای گسلی، زمینه بروز مخاطره را فراهم می‌کند، اما یافته‌های حاصل از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP) نشان داد که معیار کالبدی–ساختمانی بیشترین سهم را در تعیین الگوی نهایی خطر دارد. این نتیجه بیانگر آن است که میزان خسارات احتمالی ناشی از زلزله، بیش از آنکه صرفاً تابع ویژگی‌های زمین‌شناختی باشد، تحت تأثیر کیفیت محیط ساخته‌شده، تراکم ساختمانی، قدمت ابنیه، کیفیت مصالح، عرض معابر و نحوه سازمان فضایی شهر قرار دارد. این موضوع با دیدگاه نظری که آسیب‌پذیری را محصول تعامل میان مخاطره طبیعی و میزان مواجهه و شکنندگی سیستم‌های انسانی می‌داند، همخوانی دارد (UNDRR, 2022؛ Wisner et al., 2004).

بررسی نقشه نهایی پهنه‌بندی نیز نشان داد که تمرکز پهنه‌های با خطر نسبی بیشتر در مناطقی مشاهده می‌شود که چندین عامل خطر به‌صورت هم‌زمان در آن‌ها تجمع یافته‌اند. در این محدوده‌ها، تراکم بالاتر ساختمان‌ها، کیفیت پایین‌تر بافت کالبدی، محدودیت دسترسی به شبکه معابر اصلی، کمبود فضاهای باز و فاصله بیشتر از مراکز درمانی و امدادی موجب افزایش آسیب‌پذیری شده است. این یافته نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری شهری ماهیتی تجمعی دارد؛ به این معنا که هم‌پوشانی چند عامل خطر، آثار آن‌ها را تشدید می‌کند. بنابراین، برنامه‌ریزی شهری باید از نگاه تک‌بعدی فاصله گرفته و به سمت مدیریت یکپارچه عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شهری حرکت کند.

نتایج پژوهش همچنین نشان داد که معیارهای طبیعی اگرچه در ایجاد زمینه وقوع مخاطره نقش بنیادین دارند، اما شدت خسارات بالقوه تا حد زیادی تحت تأثیر نحوه توسعه کالبدی شهر قرار می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر، مخاطره طبیعی

پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر است، اما تبدیل آن به بحران شهری، تابع کیفیت برنامه‌ریزی، نحوه استقرار کاربری‌ها، استاندارد ساخت‌وساز و ظرفیت زیرساخت‌های شهری است. این موضوع یکی از اصول اساسی مدیریت ریسک سوانح محسوب می‌شود که بر کاهش آسیب‌پذیری به‌جای کنترل مخاطره طبیعی تأکید دارد (Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030).

از سوی دیگر، تحلیل معیار دسترسی به مراکز درمانی–امدادی نشان داد که توزیع فضایی خدمات امدادی در همه بخش‌های شهر از وضعیت یکسانی برخوردار نیست. هرچند وجود مراکز درمانی نقش مهمی در کاهش تلفات پس از زلزله دارد، اما کارایی این مراکز وابسته به کیفیت شبکه ارتباطی و امکان دسترسی سریع در شرایط بحران است. بنابراین صرف افزایش تعداد مراکز امدادی بدون توجه به ساختار شبکه دسترسی، نمی‌تواند موجب ارتقای تاب‌آوری شهری شود.

در خصوص معیار فضاهای باز و دسترسی نیز نتایج نشان داد که این فضاها علاوه بر نقش زیست‌محیطی و اجتماعی، یکی از زیرساخت‌های کلیدی مدیریت بحران محسوب می‌شوند. فضاهای باز شهری در هنگام وقوع زلزله امکان تخلیه اضطراری، اسکان موقت آسیب‌دیدگان، استقرار نیروهای امدادی و توزیع خدمات پشتیبانی را فراهم می‌کنند. بنابراین، کمبود این فضاها در برخی محلات شهر زنجان می‌تواند ظرفیت پاسخ‌گویی شهر را در شرایط بحران کاهش دهد. این یافته بیانگر آن است که حفظ و توسعه فضاهای باز باید به‌عنوان بخشی از سیاست‌های کاهش خطرپذیری در برنامه‌های توسعه شهری موردتوجه قرار گیرد.

نتایج مربوط به معیار جمعیتی نیز نشان داد که تراکم جمعیت زمانی به عامل اصلی افزایش خطر تبدیل می‌شود که همراه با تراکم ساختمانی بالا، کیفیت نامناسب محیط ساخته‌شده و کمبود خدمات شهری باشد. بنابراین، صرف تمرکز جمعیت به‌تنهایی عامل آسیب‌پذیری نیست، بلکه نحوه سازمان‌دهی فضایی شهر و ظرفیت زیرساخت‌های موجود تعیین می‌کند که این تمرکز تا چه اندازه به افزایش خسارات منجر شود. این نتیجه اهمیت توجه به عدالت فضایی در توزیع خدمات، زیرساخت‌ها و امکانات عمومی را در فرآیند توسعه شهری آشکار می‌سازد.

از منظر روش‌شناختی، به‌کارگیری هم‌زمان مدل ANP، منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، امکان تحلیل روابط پیچیده میان معیارهای مختلف را فراهم کرد. برخلاف روش‌های سلسله‌مراتبی که استقلال معیارها را فرض می‌کنند، مدل ANP وابستگی متقابل میان شاخص‌ها را در نظر می‌گیرد و تلفیق آن با توابع عضویت فازی موجب کاهش عدم قطعیت موجود در داده‌های مکانی می‌شود. در نهایت، استفاده از GIS نیز امکان نمایش فضایی نتایج و شناسایی دقیق‌تر نواحی دارای اولویت مداخله را فراهم ساخته است. ازاین‌رو، رویکرد تلفیقی به‌کاررفته در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان چارچوبی مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سایر شهرهای کشور نیز مورداستفاده قرار گیرد.

درمجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ارتقای ایمنی شهر زنجان در برابر زلزله تنها از طریق مقاوم‌سازی ساختمان‌ها حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند نگرشی جامع به توسعه شهری است که در آن کیفیت کالبدی، توزیع خدمات عمومی، شبکه دسترسی، فضاهای باز، ویژگی‌های جمعیتی و ملاحظات طبیعی به‌صورت هم‌زمان در سیاست‌های توسعه و مدیریت شهری لحاظ شوند. چنین رویکردی می‌تواند ضمن کاهش آسیب‌پذیری، زمینه تحقق توسعه شهری پایدار و افزایش تاب‌آوری شهر در برابر مخاطرات طبیعی را فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی خطر زلزله شهر زنجان با تأکید بر توسعه شهری و با بهره‌گیری از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد. تلفیق این سه روش امکان ارزیابی هم‌زمان

معیارهای طبیعی، کالبدی–ساختمانی، جمعیتی، دسترسی به مراکز درمانی–امدادی و فضاهای باز را فراهم کرد و در نهایت نقشه‌ای از توزیع نسبی خطر لرزه‌ای در سطح شهر زنجان ارائه شد.

نتایج پژوهش نشان داد که الگوی خطر لرزه‌ای در شهر زنجان از توزیع یکنواختی برخوردار نیست و تفاوت محسوسی میان نواحی مختلف شهر از نظر میزان آسیب‌پذیری وجود دارد. بر اساس وزن‌های حاصل از مدل ANP، معیار کالبدی–ساختمانی بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری الگوی نهایی خطر داشته است که بیانگر نقش تعیین‌کننده کیفیت محیط ساخته‌شده، ویژگی‌های ساختمان‌ها و ساختار کالبدی شهر در کاهش یا افزایش خسارات ناشی از زلزله است. همچنین مشخص شد که عوامل طبیعی، خدماتی و جمعیتی نیز در تعامل با یکدیگر الگوی نهایی خطر را شکل می‌دهند و هیچ‌یک از آن‌ها به‌تنهایی تبیین‌کننده وضعیت آسیب‌پذیری شهر نیستند.

از منظر برنامه‌ریزی شهری، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که کاهش خطر زلزله مستلزم اتخاذ رویکردی یکپارچه در مدیریت توسعه شهری است. هدایت توسعه آتی شهر به سمت پهنه‌های مناسب، ارتقای کیفیت ساخت‌وساز، بازآفرینی بافت‌های فرسوده، تقویت شبکه دسترسی، بهبود پراکنش مراکز درمانی و امدادی و حفظ و توسعه فضاهای باز شهری از مهم‌ترین اقداماتی هستند که می‌توانند ظرفیت تاب‌آوری شهر را در برابر زلزله افزایش دهند. بنابراین، نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای اولویت‌بندی مداخلات شهری، بازنگری در طرح‌های توسعه و تدوین برنامه‌های مدیریت بحران مورداستفاده مدیران و برنامه‌ریزان شهری قرار گیرد.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق هم‌زمان مدل ANP، منطق فازی و GIS برای ارزیابی چندمعیاره خطر زلزله با تأکید بر توسعه شهری است. این رویکرد علاوه بر تعیین اهمیت نسبی معیارها، امکان تحلیل فضایی روابط پیچیده میان آن‌ها را نیز فراهم ساخته و تصویری جامع‌تر از وضعیت آسیب‌پذیری شهر ارائه می‌دهد. ازاین‌رو، چارچوب پیشنهادی پژوهش قابلیت به‌کارگیری در سایر شهرهای لرزه‌خیز کشور را نیز دارد.

باوجوداین، نتایج پژوهش متأثر از کیفیت و مقیاس داده‌های ورودی است. محدودیت در دسترسی به برخی داده‌های به‌روز زمین‌شناسی، اطلاعات دقیق ویژگی‌های ساختمان‌ها و برخی لایه‌های مکانی از جمله محدودیت‌های این مطالعه به شمار می‌رود و می‌تواند بر دقت ارزیابی نهایی اثرگذار باشد. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده با استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، اطلاعات به‌روز لرزه‌زمین‌ساختی، تصاویر سنجش‌ازدور، مدل‌های یادگیری ماشین و تحلیل سناریوهای مختلف وقوع زلزله، ارزیابی جامع‌تری از خطر و آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر زنجان و سایر شهرهای کشور انجام شود. همچنین بررسی ابعاد نهادی، اقتصادی و اجتماعی تاب‌آوری شهری در کنار ارزیابی‌های کالبدی می‌تواند به تدوین سیاست‌های مؤثرتر برای کاهش ریسک و دستیابی به توسعه شهری پایدار کمک کند.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

در پژوهش نویسندگان در تمامی مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری‌رسان بوده‌اند، به ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را عهده دار بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نماییم.

منابع

احدنژاد روشتی، محسن. (۱۳۸۸). مدل‌سازی آسیب‌پذیری ساختمانی شهرها در برابر زلزله با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (نمونه موردی: شهر زنجان). پایان‌نامه دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه تهران.

ایمانی، بهرام و پورخسروانی، محسن. (۱۳۹۶). تحلیل فضایی پهنه‌های مخاطره‌آمیز شهرستان اردبیل. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۸ (۲)، ۱۰۹-۱۲۸.

پورمحمدی، محمدرضا و کرمی، محمدرضا (۱۳۹۳). ترکیب مدل کرنل (KDE) و مدل AHP در ارزیابی خطر زلزله در بافت‌های حاشیه‌نشین و فرسوده شهری با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی مناطق یک و پنج شهر تبریز. *نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۸ (۵۰)، ۵۵-۸۸.

پورمحمدی، محمدرضا و مصیب‌زاده، علی. (۱۳۸۷). آسیب‌پذیری شهرهای ایران در برابر زلزله و نقش مشارکت محله‌ای در امدادرسانی آن‌ها. *جغرافیا و توسعه*، ۶ (۱۲)، ۱۱۷-۱۴۴.

تیری، هادی و کرمی، محمدرضا. (۱۳۹۵). امکان‌سنجی آسیب‌پذیری شهر سنندج در برابر زلزله با استفاده از مدل متوسط وزنی مرتب‌شده (OWA). *نشریه مطالعات نواحی شهری*، ۳ (۱)، ۱۳۵-۱۵۲.

حبیبی، کیومرث؛ پوراحمد، احمد؛ مشکینی، ابوالفضل؛ عسگری، علی و نظری عدلی، سعید. (۱۳۸۷). تعیین عوامل سازه‌ای مؤثر در آسیب‌پذیری بافت کهن شهری زنجان با استفاده از FUZZY LOGIC و GIS. *نشریه هنرهای زیبا*، ۳۳، ۲۷-۳۶.

حسنلو، معصومه؛ زندی، رحمان و سلمانی مقدم، محمد (۱۴۰۳). ارزیابی جهش شهری و جهات مستعد توسعه شهر با تأکید بر مخاطره زلزله (مطالعه موردی: شهر زنجان). *کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم محیطی*، ۴ (۱۳)، ۶۷-۴۱.

رازانی، اسد؛ نوذری، کمال و رفیعیان، مجتبی. (۱۴۰۰). تبیین ابعاد و مؤلفه‌های الگوی مناسب مدیریت بحران زلزله در بافت‌های فرسوده شهر تهران. *فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۱(۴)، ۳۱-۵۰.

ربیعی، علی و حسینی، سیرا السادات. (۱۳۹۲). *مدیریت بحران، مفاهیم، الگوها و شیوه‌های برنامه‌ریزی در بحران طبیعی*. تهران: انتشارات تیما.

رجایی، سید عباس؛ منصوریان، حسین و سلطانی، مرضیه (۱۴۰۰). تحلیل فضایی تاب‌آوری شهری در برابر زلزله مطالعه موردی: منطقه یک شهر تهران. *مجله شهر پایدار*، ۴ (۱)، ۱-۱۳.

روستایی، شهریور؛ حیدری چیانه، رحیم و ذوقی، ایوب (۱۴۰۴). کاربرد الگوریتم KNN در بهینه‌سازی کاربری اراضی شهری با تأکید بر خطر زلزله نمونه موردی: شهر سنندج. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵ (۷۶)، ۱۲۶-۱۴۲.

زارع، مهدی (۱۳۸۰). خطر زمین‌لرزه و ساخت‌وساز در حریم گسل شمال تبریز و حریم گسل‌های زمین‌لرزه‌ای ایران، پژوهشگاه مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران، ۴ (۲)، ۴۶-۵۷.

ضرغامی، عیسی. (۱۳۹۷). بررسی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در بافت‌های فرسوده شهری (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهر زنجان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.

علی‌اکبری، اسماعیل و میرایی، نفیسه السادات (۱۳۹۴). آسیب‌شناسی و پهنه‌بندی لرزه‌ای بافت شهری (مطالعه موردی: شهرک ولیعصر تبریز). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۹ (۵۴)، ۲۱۱-۲۳۳.

قنبران، حسینعلی؛ حسینی، سید بهرام؛ دوست، پیمان و ابراهیمی، فرهاد. (۱۳۹۸). مکان‌یابی مراکز بیمارستانی با تکیه بر مخاطرات طبیعی و با بهره‌گیری از مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) نمونه موردی (منطقه پنج شهر تهران). *آمایش محیط*، ۱۲ (۴۴)، ۱۵۶-۱۲۷.

قنبری، ابوالفضل؛ سالکی ملکی، محمدعلی و قاسمی، معصومه. (۱۳۹۲). پهنه‌بندی میزان آسیب‌پذیری شهرها در مقابل خطر زمین‌لرزه (نمونه موردی: شهر تبریز). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲ (۵)، ۲۱-۳۵.

محمدپور، ابراهیم (۱۳۹۸). مکان‌یابی مراکز اسکان موقت شهر اردبیل بعد از وقوع زلزله با استفاده ازGIS. *فصلنامه پژوهش‌های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی*، ۱ (۲۱)، ۷۷-۹۱.

نعمتی، اسکندر؛ حمیدزاده خیاوی، سهیلا و نظم‌فر، حسین. (۱۴۰۴). تحلیل پهنه‌بندی خطر زلزله در چارچوب سیاست‌گذاری توسعه شهری زنجان. *سیاست‌گذاری شهری و منطقه‌ای*، ۴ (۱۶)، ۱۴-۲۸.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای زنجان، https://www.znrw.ir/، ۱۴۰۳.

References

Ahdnejad Roshti, M. (2009). *Structural vulnerability modeling of cities against earthquakes using the analytic hierarchy process in a geographic information system environment (Case study: Zanjan)* [Doctoral dissertation, University of Tehran]. [In Persian]

Aliakbari, E., & Miraei, N. S. (2015). Pathology and seismic zoning of urban texture (Case study: Valiasr Town, Tabriz). *Geography and Planning*, *19*(54), 211–233. [In Persian]

Atreya, A., & Kunreuther, H. (2020). Assessing community resilience: Mapping the community rating system (CRS) against the 6C-4R frameworks. *Environmental Hazards*, *19*(1), 30–49.

Berkes, F. (2007). Understanding uncertainty and reducing vulnerability: Lessons from resilience thinking. *Natural Hazards*, *41*(2), 283–295.

Brabhaharan, P. (2013). *Earthquake resilience through early integrated urban planning and practice*. Presented at the 2013 NZSEE Conference.

Brown, K. (2014). Global environmental change I: A social turn for resilience? *Progress in Human Geography*, *38*(1), 107–117.

Buckle, P. (2001). *Assessing resilience and vulnerability: Principles, strategies and actions*. Victorian Government Publishing Services.

Erden, T., & Karaman, H. (2012). Analysis of earthquake parameters to generate hazard maps by integrating AHP and GIS for Küçükçekmece region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *12*, 475–483.

Esteban, T. A. O. (2022). *Collective engagement: From disaster-prone to disaster-resilient city* [Doctoral dissertation, Erasmus University Rotterdam].

Ghanbaran, H. A., Hosseini, S. B., Doust, P., & Ebrahimi, F. (2019). Site selection of hospital centers relying on natural hazards using the analytic network process (ANP) model; Case study (District 5 of Tehran). *Environmental Planning*, *12*(44), 127–156. [In Persian]

Ghanbari, A., Saleki Maleki, M. A., & Ghasemi, M. (2013). Zoning of city vulnerability to earthquake risk (Case study: Tabriz). *Geography and Environmental Hazards*, *2*(5), 21–35. [In Persian]

Habibi, K., Pourahmad, A., Meshkini, A., Asgari, A., & Nazari Adli, S. (2008). Determining structural factors affecting the vulnerability of the old texture of Zanjan using FUZZY LOGIC and GIS. *Fine Arts Journal*, *33*, 27–36. [In Persian]

Hasanlou, M., Zandi, R., & Salmani Moghaddam, M. (2024). Evaluating urban sprawl and directions prone to city development with emphasis on earthquake hazard (Case study: Zanjan). *Application of Remote Sensing and GIS in Environmental Sciences*, *4*(13), 41–67. [In Persian]

Imani, B., & Pourkhosravani, M. (2017). Spatial analysis of hazardous zones in Ardabil County. *Geography and Environmental Planning*, *28*(2), 109–128. [In Persian]

Kapucu, N., Ge, Y., Martin, Y., & Williams, Z. (2022). Urban resilience for building sustainable and safe environments. *Urban Governance, 1*(1), 10–16.

Lee, H., Song, K., Kim, G. W., & Chon, J. (2021). Flood-adaptive green infrastructure planning for urban resilience. *Landscape and Ecological Engineering, 17*(4), 427–437.

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning, 147*, 38–49.

Mohammadpour, E. (2019). Site selection of temporary accommodation centers in Ardabil after an earthquake using GIS. *New Research in Geographical Sciences, Architecture and Urban Planning Quarterly, 1*(21), 77–91. [In Persian]

Motamed, H., Ghafory-Ashtiany, M., Amini-Hosseini, K., Mansouri, B., & Khazai, B. (2020). Earthquake risk-sensitive model for urban land use planning. *Natural Hazards, 103*(1), 87–102.

Nemati, E., Hamidzadeh Khiyavi, S., & Nazmfar, H. (2025). Analysis of earthquake risk zoning within the framework of urban development policymaking in Zanjan. *Urban and Regional Policymaking, 4*(16), 14–28. [In Persian]

Nyimbili, P. H., Erden, T., & Karaman, H. (2018). Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Natural Hazards, 92*(3), 1523–1546.

Peng, Y., Zhang, Y., Tian, L., Zhang, S., & Li, Y. (2023). Urban resilience assessment: A systematic review and future research directions. *Sustainable Cities and Society, 95*, 104603. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104603

Pourmohammadi, M. R., & Karami, M. R. (2014). Combining the Kernel Density Estimation (KDE) model and the AHP model in earthquake risk assessment in marginal and worn-out urban textures using geographic information systems (GIS); Case study of Districts 1 and 5 of Tabriz. *Scientific Journal of Geography and Planning, 18*(50), 55–88. [In Persian]

Pourmohammadi, M. R., & Mosayebzadeh, A. (2008). Vulnerability of Iranian cities to earthquakes and the role of neighborhood participation in their relief. *Geography and Development, 6*(12), 117–144. [In Persian]

Rabiei, A., & Hosseini, S. S. (2013). *Crisis management: Concepts, models, and planning methods in natural crises*. Tima Publications. [In Persian]

Rajaei, S. A., Mansourian, H., & Soltani, M. (2021). Spatial analysis of urban resilience against earthquakes; Case study: District 1 of Tehran. *Sustainable City Journal, 4*(1), 1–13. [In Persian]

Razani, A., Nozari, K., & Rafieian, M. (2021). Explaining the dimensions and components of an appropriate earthquake crisis management model in the worn-out textures of Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge Quarterly, 11*(4), 31–50. [In Persian]

Roustaei, S., Heydari Chianeh, R., & Zoghi, A. (2025). Application of the KNN algorithm in optimizing urban land use with emphasis on earthquake risk; Case study: Sanandaj. *Applied Research in Geographical Sciences, 25*(76), 126–142. [In Persian]

Saaty, T. L. (2005). *Theory and applications of the Analytic Network Process: Decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. RWS Publications.

Shafapour Tehrany, M., Batur, M., Shabani, F., Pradhan, B., Kalantar, B., & Özener, H. (2023). A comprehensive review of geospatial technology applications in earthquake preparedness, emergency management and damage assessment. *Remote Sensing, 15*(7), 1939. https://doi.org/10.3390/rs15071939

Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60*, 1654–1677.

Spence, R., So, E., Ameri, G., Akinci, A., Cocco, M., Cultrera, G., ... & Lombardi, A. M. (2007). *Earthquake disaster scenario prediction and loss modelling for urban areas* (Lessloss Report, 7, 165).

Tiri, H., & Karami, M. R. (2016). Feasibility assessment of Sanandaj city vulnerability to earthquakes using the Ordered Weighted Averaging (OWA) model. *Urban Area Studies Journal, 3*(1), 135–152. [In Persian]

Tompkins, E. L., & Adger, W. N. (2004). Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? *Ecology and Society, 9*(2), 10.

United Nations. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special edition*. United Nations.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2022). *Global assessment report on disaster risk reduction 2022: Our world at risk: Transforming governance for a resilient future*. UNDRR.

Windle, G. (2011). What is resilience? A review and concept analysis. *Reviews in Clinical Gerontology, 21*(2), 152–169.

Zanjan Regional Water Company. (2024). https://www.znrw.ir/ [In Persian]

Zareh, M. (2001). Earthquake risk and construction within the North Tabriz fault zone and the seismic fault zones of Iran. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 4*(2), 46–57. [In Persian]

Zarghami, I. (2018). *Investigating building vulnerability in worn-out urban textures (Case study: Central part of Zanjan)* [Master's thesis, University of Zanjan]. [In Persian]