



A Systematic Review of Earthquake Vulnerability Assessment Studies in Iran

Siamak Tahmasbi¹, Seyed Ali Badri^{1*}, Bahman Tahmasi¹,
Hossein Hosseinpour¹

¹Department of Human Geography and Planning, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 16 July 2026

Revised: 06 October 2026

Accepted: 08 October 2026

Available Online:

08 October 2026

Keywords:

Vulnerability Assessment

Iran

Earthquake

Hazards

Systematic Review

Iran is located within one of the world's most seismically active regions, making earthquake vulnerability assessment essential for disaster risk management. Despite the growing number of studies, variations in frameworks, indicators, and methods have limited a coherent understanding of the field. This study systematically reviews earthquake vulnerability assessment research in Iran to identify trends, methodological characteristics, and research gaps. A systematic review was conducted following the PRISMA framework. Relevant studies were identified through a structured screening process and analyzed using qualitative coding in MAXQDA to extract conceptual, methodological, and thematic patterns. Earthquake vulnerability research in Iran has increased over the past two decades but remains concentrated in urban areas, particularly Tehran. Most studies lack theoretical foundations and rely on indicator aggregation. Physical dimensions dominate, while social and institutional aspects receive limited attention. Indicator-based GIS approaches prevail, with weighting based on expert judgment, whereas data-driven methods, sensitivity analysis, and advanced spatial techniques remain limited. Despite substantial growth, earthquake vulnerability research in Iran still faces theoretical and methodological limitations. Strengthening conceptual frameworks, promoting integrated and multidimensional approaches, expanding analytical methods, and strengthening the research-policy link are essential to enhance the reliability and practical value of vulnerability assessments.

* Corresponding author: Seyed Ali Badri

E-mail address: sabadri@ut.ac.ir

How to cite this article: Tahmasbi, S., Badri, S. A., Tahmasi, B. & Hosseinpour, H. (2026). A Systematic Review of Earthquake Vulnerability Assessment Studies in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoh.2026.99828.1684>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Iran is situated along the active Alpine–Himalayan seismic belt, making it inherently prone to frequent and often destructive earthquakes. Over recent decades, numerous seismic events have caused extensive human casualties, economic losses, and widespread physical and social disruption. Rapid population growth, accelerating urbanization, the expansion of informal settlements, and increasing spatial inequalities have exacerbated earthquake vulnerability across space. Under such conditions, vulnerability assessment has become a critical prerequisite for effective disaster risk management and for planning strategies aimed at mitigating impacts. However, the concept of vulnerability, due to its multidimensional, dynamic, and interdisciplinary nature, has consistently posed challenges in terms of definition, assessment, and modeling, and no clear consensus has yet emerged within the scientific literature. In Iran, a considerable number of studies on earthquake vulnerability assessment have been conducted over the past two decades. Nevertheless, these studies exhibit substantial diversity and fragmentation in terms of conceptual frameworks, assessment methods, selected indicators, and scales of analysis. This heterogeneity has hindered the development of a comprehensive understanding of the trends, patterns, and research gaps within this field. Accordingly, the main aim of this study is to undertake a systematic review of the Iranian scholarly literature in order to address the question of how earthquake vulnerability assessment has been theoretically conceptualized and methodologically operationalized in Iran, and to identify the key limitations and research gaps that characterize this body of work. By providing a comprehensive overview of the approaches, indicators, and methods used to assess earthquake vulnerability in Iran, the findings of this systematic review can help improve the understanding of the current situation, identify research gaps, and enhance vulnerability assessment frameworks. Furthermore, the study's results can serve as a basis for prioritizing areas requiring further investigation and for supporting earthquake risk reduction planning and crisis management in Iran.

Material and Methods

This research was conducted using a systematic literature review (SLR) approach, following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) framework. To this end, the study progressed through four primary stages: identification, screening, eligibility assessment, and final inclusion. Initially, relevant publications concerning earthquake vulnerability assessment in Iran were retrieved from national scholarly databases. Subsequently, by applying specific inclusion and exclusion criteria, irrelevant studies were filtered out, resulting in a curated set of eligible articles for analysis. In the next phase, a qualitative analysis of the selected studies was performed using MAXQDA software through a systematic coding process. The core analytical themes included: definitions and conceptualizations of vulnerability, theoretical frameworks and models, applied indicators, data collection procedures, weighting and normalization techniques, aggregation methods, spatial and temporal scales, as well as sensitivity and uncertainty analyses. This structured approach enabled a comparative evaluation of the literature, facilitating the extraction of dominant patterns and prevailing trends within the domestic body of research.

Results and Discussion

The findings indicate that research on earthquake vulnerability assessment in Iran began to emerge in the late 1990s and grew significantly in the following years, reaching a peak between 2014 and 2016. This growth can be attributed to increased awareness of natural hazards, the occurrence of major earthquakes, the expansion of academic and research institutions, and the wider use of analytical tools such as Geographic Information Systems (GIS). Although a slight decline in the number of studies is observed after this period, recent years show a renewed upward trend, reflecting continued interest in this field. In terms of spatial distribution, most studies have focused on urban areas, accounting for more than 80 % of the total. In contrast, rural areas and regional-scale studies have received much less attention, indicating a significant imbalance in spatial coverage. Additionally, research is heavily concentrated in a limited number of provinces, particularly Tehran, while several seismically active regions remain understudied. This pattern suggests that the distribution of research is influenced more by factors such as the concentration of academic

institutions, data availability, and research infrastructure than by actual seismic risk levels. From a conceptual perspective, many studies lack a clearly defined theoretical framework and instead rely primarily on indicator-based approaches. This limitation reduces the analytical depth and explanatory power of the findings. Among studies that adopt a defined framework, biophysical approaches are the most commonly used, while integrated and internationally recognized frameworks receive less attention. Regarding the dimensions of vulnerability, the physical dimension is dominant. Frequently used indicators include building characteristics, construction materials, urban structure, and transportation networks. In contrast, socio-economic dimensions- such as social capital, public awareness, education, and institutional capacity- are less frequently considered. The natural dimension is typically represented by indicators related to seismicity, geological conditions, and topography. Overall, the results show a strong emphasis on the built environment, with relatively limited attention given to human and institutional factors. From a methodological standpoint, most studies use indicator-based models, with expert-based techniques- particularly the Analytic Hierarchy Process (AHP)- playing a dominant role in weighting indicators. Data-driven approaches are used much less frequently. Normalization is commonly performed using reclassification and scoring methods. A major limitation identified across many studies is the lack of sensitivity analysis and uncertainty assessment, which may affect the reliability and robustness of the results.

Conclusion

The existing body of scientific literature on earthquake vulnerability assessment in Iran, despite its notable quantitative growth, exhibits shortcomings in terms of conceptual coherence and methodological integration. An excessive focus on physical dimensions has led to the neglect of social and institutional aspects of vulnerability. Moreover, the diversity in indicator selection and the absence of standardized frameworks have limited the comparability of study results and hindered the development of a coherent cumulative body of knowledge in this field. At the same time, the predominant focus on local and urban scales- coupled with a lack of multi-scalar analyses- reveals a gap in understanding broader spatial linkages and cross-scale interactions in shaping vulnerability patterns. Challenges related to access to accurate, up-to-date, and integrated data also represent significant barriers to improving the quality of analyses, potentially affecting both the reliability of results and their applicability in decision-making processes. Accordingly, there is a clear need to move toward the development of comprehensive, integrated, and multidimensional frameworks for earthquake vulnerability assessment. Furthermore, the adoption of emerging data-driven approaches, alongside improvements in data quality and accessibility, can play a crucial role in enhancing the accuracy and effectiveness of future studies.

Author Contributions

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article.

Data Availability Statement

All data used in this study are presented within the text of the article and are accessible.

Acknowledgements

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

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this matter is confirmed by all of them.

Funding

This article is not sponsored.

Conflict of interest

Authors declared no conflict of interest.



مروری نظام‌مند بر پژوهش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران

سیامک طهماسبی^۱، سیدعلی بدری^{۱*}، بهمن طهماسبی^۱، حسین حسین‌پور^۱

^۱ گروه جغرافیای انسانی و برنامه‌ریزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۶ کلمات کلیدی: ارزیابی آسیب‌پذیری ایران زلزله مخاطرات مرور نظام‌مند	ایران در یکی از فعال‌ترین کمربندهای لرزه‌ای جهان قرار دارد و ارزیابی آسیب‌پذیری نقش مهمی در مدیریت ریسک بلایا دارد. با وجود افزایش مطالعات در دو دهه اخیر، تنوع رویکردها و شاخص‌ها مانع شکل‌گیری درک منسجم شده است. هدف این پژوهش، بررسی نظام‌مند مطالعات داخلی برای شناسایی روندها، رویکردها و خلأهای پژوهشی است. این پژوهش با استفاده از روش مرور نظام‌مند و بر اساس چارچوب PRISMA انجام شده است. در این فرآیند، مقالات مرتبط پس از طی مراحل شناسایی، غربالگری و انتخاب، گردآوری شدند و سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار MAXQDA و از طریق کدگذاری کیفی، مورد تحلیل قرار گرفتند تا الگوهای مفهومی، روش‌شناختی و محتوایی مطالعات استخراج شود. مطالعات آسیب‌پذیری زلزله در ایران روند رو به رشد داشته و عمدتاً بر مناطق شهری و چند استان خاص، به‌ویژه تهران، متمرکز بوده‌اند. بسیاری از این پژوهش‌ها فاقد چارچوب نظری مشخص هستند و بیشتر بر جمع‌شدها تکیه دارند. در این میان، شاخص‌های کالبدی غالباًند و ابعاد اجتماعی و نهادی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از نظر روش‌شناسی نیز اغلب مطالعات مبتنی بر رویکردهای شاخص‌محور در محیط GIS هستند و در وزندهی به شاخص‌ها به‌طور قابل‌توجهی به قضاوت کارشناسی وابسته‌اند، در حالی که استفاده از روش‌های داده‌محور، تحلیل حساسیت و تکنیک‌های پیشرفته تحلیل فضایی کمتر مورد توجه بوده است. با وجود رشد کمی مطالعات در حوزه آسیب‌پذیری زلزله در ایران، این حوزه با چالش‌هایی همچون ضعف در بنیان‌های نظری و محدودیت در روش‌های تحلیلی مواجه است. بنابراین، ارتقای چارچوب‌های مفهومی، توسعه رویکردهای یکپارچه، و تقویت پیوند میان پژوهش و سیاست‌گذاری، از الزامات اساسی برای بهبود کیفیت ارزیابی آسیب‌پذیری و افزایش کارایی آن در مدیریت ریسک بلایا به شمار می‌رود.

مقدمه

ایران بر روی کمربند لرزه‌ای فعال آلپ- هیمالیا^۱ قرار گرفته است که یکی از پرخطرترین مناطق زلزله‌خیز جهان است (Farahani, Behnam & Tahershamsi, 2020; Berberian, 2014; Farahmand, Samet, Golmohammadi & Patel, 2022). این کمربند به شدت مستعد فعالیت‌های لرزه‌ای است؛ به‌طوری‌که در ایران، بر اساس داده‌های پایگاه داده زلزله سازمان

1 - Alpide

E-mail: : sabadri@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: سیدعلی بدری

زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ حدود ۷۱۷۹ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۲.۵ ریشتر رخ داده است که از میان، ۷۵۶ زمین‌لرزه بیش از ۵ ریشتر بوده است (Earthquake.usgs.gov)^۱. همچنین ایران در طی چند دهه گذشته زمین‌لرزه‌های مخربی را تجربه کرده است (Ghafory-Ashtiany, 2014) که در مکان‌ها و جوامع زلزله‌زده منجر به خسارات اقتصادی و کاهش رفاه خانوار (Shahpari, Sadeghi, Ashena & Shahpari, 2021)، نرخ مرگ‌ومیر بالا و مصدومیت (Eshghi & Nikpayam, 2013; Fallahi, 2013)، کاهش سلامت روان (Ahari, 2005; Amiri et al., 2022; Kalantari & Vostanis, 2010)، مسائل اجتماعی (Alipour et al., 2015)، آوارگی و بی‌خانمانی (Eshghi & Ahari, 2005)، تخریب زیرساخت‌ها (Foong, 2020; Nikpayam, 2013) و وقوع مخاطرات زمین‌ساختی مانند زمین‌لغزش، فرونشست زمین و ریزش سنگ (Jamali & Lyu, 2020; Amini Hosseini, 2020; Ghayamghamian, 2012; Foong et al., 2020) شده است.

علاوه بر روند افزایشی وقوع رخداد زمین‌لرزه در ایران [بر اساس داده‌های پایگاه داده زلزله سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده]، رشد سریع شهرنشینی و افزایش جمعیت (Talebian et al., 2016; Habibi, Basirat & Razavi, 2020; Ommi & Amini, 2024)، گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی و حاشیه‌ای شدن در کلان‌شهرها (Pilehvar, 2021)، نابرابری‌های فضایی (Azmi, 2024)، گسترش سکونتگاه‌های غیررسمی و حاشیه‌ای شدن در کلان‌شهرها (Pilehvar, 2021)، نابرابری‌های فضایی (Azmi, 2024)، آسیب‌پذیری و نداشت نقشه^۲ آن برای کاهش ریسک بلایا، درک تأثیرات بالقوه زمین‌لرزه و توسعه برنامه‌های مدیریت بلایا، ضروری است (Jena & Pradhan, 2019)، به‌گونه‌ای که برخی از محققین این اقدام را پیش‌شرط برآورد ریسک حال و آینده می‌دانند (Jena, Pradhan & Beydoun, 2020). بر این اساس، در طول دو دهه گذشته، آسیب‌پذیری به‌عنوان یک مفهوم اساسی در پژوهش‌های مخاطرات و در توسعه راهبردهای کاهش^۳ در سطوح محلی، ملی و بین‌المللی مطرح شده است (Rashed & Weeks, 2003).

تعریف مفهوم آسیب‌پذیری، یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در این زمینه است و تاکنون تعریفی که پژوهشگران بر روی آن اتفاق نظر داشته باشند، ارائه نشده است (Wolf et al., 2013). این امر به ماهیت مفهوم آسیب‌پذیری مربوط می‌شود که مفهومی چندبعدی (Gerçek & Güven, 2023; Ramli & Alias, 2024)، بین‌رشته‌ای (Bruno Soares, Gagnon & Doherty, 2012)، پیچیده (Cutter & Finch, 2008; Crane, Delaney, Tamás, Chesterman & Ericksen, 2017)، فازی (Ford et al., 2018)، زمینه‌محور^۴ (Crane et al., 2017) و پویا (Cutter & Finch, 2008; Aubrecht, Freire, Neuhold, Curtis & Steinnocher, 2012) است. در نتیجه، انواع متفاوت و در مواردی متضاد از مفهوم‌پردازی‌ها، رویکردها و روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری (Matasci, 2012; Kuhlicke et al., 2012) را شاهد هستیم. بنابراین، درک و توانایی ارزیابی آسیب‌پذیری از عوامل کلیدی در مدیریت کاهش ریسک بلایا به شمار می‌رود. آسیب‌پذیری تنها زمانی می‌تواند تصویری واضح از ابعاد پیامدهای احتمالی ارائه دهد که به‌طور مؤثر ارزیابی شود. این ارزیابی به ما کمک می‌کند تا اهداف مشخصی برای طراحی و اجرای برنامه‌های کاهش تعیین کنیم. با ارزیابی آسیب‌پذیری به‌صورت صحیح و دقیق، می‌توان منابع و اقدامات را به شکل بهتری برای کاهش مخاطرات و افزایش ایمنی جامعه به کار گرفت (Armaş, Toma-Danila, Ionescu & Gavriş, 2017). در ایران، طی دو دهه گذشته، ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله، در مقیاس‌های جغرافیایی مختلف با اهداف مختلف به‌کاررفته است. در جدیدترین مطالعه، روند وقوع مخاطره زلزله را بر اساس داده‌های ۲۸ ساله در سطح کشور تحلیل کرده و با مدل‌های مکانی-زمانی تلفیق کرده‌است. یافته‌های این پژوهش، بازنگری در سیاست‌های مدیریت بحران را برجسته می‌کند (Moghabeli, Bahadori & Mohammadi, 2025).

در این پژوهش، یک مرور نظام‌مند ادبیات از رویکردهای مفهوم‌پردازی و روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران دنبال می‌شود که به شناسایی کمبودها و خلأهای موجود در مطالعات انجام‌شده کمک می‌کند. بنابراین، سؤالات قابل طرح در این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) رویکردهای غالب در مفهوم‌پردازی آسیب‌پذیری زلزله کدام‌اند؟ (۲) کدام روش‌ها و

1 - <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

2 - Mapping

3 - Mitigation

4 - Context-specific

تکنیک ها برای ارزیابی آسیب پذیری بکار گرفته شده است؟ (۳) از کدام شاخص ها برای ارزیابی آسیب پذیری استفاده شده است؟ (۴) بیشترین تمرکز مطالعاتی در کدام یک از مناطق جغرافیایی بوده است؟ (۵) شکاف های پژوهشی و موضوعات مغفول مانده در این زمینه کدام هستند؟

یافته های این مرور نظام مند با ارائه تصویری جامع از رویکردها، شاخص ها و روش های مورد استفاده در ارزیابی آسیب پذیری زلزله در ایران، می تواند به شناخت بهتر وضعیت موجود، شناسایی خلأ های پژوهشی و بهبود چارچوب های ارزیابی آسیب پذیری کمک کند. همچنین، نتایج این مطالعه می تواند مبنایی برای اولویت بندی مناطق نیازمند بررسی های بیشتر و پشتیبانی از برنامه ریزی های کاهش ریسک و مدیریت بحران زلزله در ایران فراهم آورد.

مواد و روش ها

مرور نظام مند روشی دقیق و ساختاریافته برای ترکیب و تحلیل مطالعات انجام شده در یک حوزه پژوهشی خاص است. در این روش، تمامی مطالعات اولیه مرتبط با موضوع به صورت نظام مند گردآوری، ارزیابی و خلاصه سازی می شوند (Caldwell & Bennett, 2020). مرورهای نظام مند بر اساس یک پروتکل از پیش تعیین شده انجام می شوند تا احتمال سوگیری به حداقل برسد. این پروتکل شامل تعریف سؤال پژوهشی مشخص، تدوین راهبرد جستجوی نظام مند و تعیین معیارهای دقیق برای ورود و حذف مطالعات است (Perestelo-Pérez, 2013).

با توجه به اینکه هدف این پژوهش، بررسی رویکردهای مفهوم پردازی و روش های مورد استفاده برای ارزیابی آسیب پذیری زلزله در ایران بود، دامنه جستجو بر مطالعات انجام شده در ایران و منتشر شده به زبان فارسی متمرکز شد. بر این اساس، جستجوی مطالعات در دو پایگاه اطلاعاتی داخلی مگیران (Magiran) و پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) انجام گرفت. انتخاب این دو پایگاه با توجه به تمرکز پژوهش بر ادبیات علمی داخلی و پوشش گسترده مقالات علمی منتشر شده به زبان فارسی در حوزه های مرتبط با پژوهش صورت گرفت. انتخاب از نظر زمانی، جستجوی مطالعات از ابتدای دوره انتشار مقالات مرتبط تا پایان سال ۱۴۰۳ انجام شد. بنابراین، مقالات منتشر شده در پایگاه های بین المللی مانند Scopus، Web of Science و ScienceDirect در دامنه جستجوی این مطالعه قرار نگرفتند؛ زیرا هدف پژوهش، مرور ادبیات داخلی مرتبط با ارزیابی آسیب پذیری زلزله در ایران بود.

در این پژوهش از دستورالعمل PRISMA (موارد ترجیحی برای گزارش مرورهای نظام مند و فراتحلیل ها) استفاده شد. این چارچوب به مستندسازی فرآیند شناسایی، غربالگری و انتخاب مطالعات برای ورود به انجام تحقیق کمک می کند. همچنین، این دستورالعمل اجزای اصلی گزارش یک مرور نظام مند را شامل می شود؛ از جمله عنوان، چکیده، روش شناسی، نتایج و بحث. شکل جریان PRISMA نشان می دهد که اطلاعات چگونه در مراحل مختلف مرور نظام مند حرکت می کنند و به طور دقیق مشخص می کند چه تعداد مقاله شناسایی، غربالگری، ارزیابی صلاحیت و در نهایت در مطالعه وارد شده اند (Anugwa et al., 2023). فرآیند مرور نظام مند در این پژوهش در چهار مرحله انجام شد (شکل ۱).

به منظور مستندسازی و افزایش شفافیت فرآیند استخراج و تحلیل داده ها، نمونه ای از محیط و داده های کدگذاری شده در نرم افزار MAXQDA در شکل ۲ ارائه شده است. این نمونه، نحوه سازمان دهی، کدگذاری و استخراج اطلاعات از مطالعات منتخب را نشان می دهد.

مقالات نهایی پس از انتخاب، برای تحلیل کیفی وارد نرم افزار MAXQDA شدند. در این مرحله، به منظور استخراج و سازمان دهی مفاهیم و رویکردهای مورد استفاده در مطالعات، فرایند کدگذاری انجام گرفت. مهم ترین محورهای مورد بررسی و کدگذاری در مقالات شامل این موارد بودند: (۱) تعریف و مفهوم پردازی آسیب پذیری، (۲) مبانی نظری، چارچوب ها و مدل ها، (۳) شاخص های مورد استفاده، (۴) روش های وزندهی به شاخص ها، (۵) روش های نرمال سازی شاخص ها، (۶) روش های جمع آوری داده، (۷) روش های ارزیابی، (۸) مقیاس های فضایی و زمانی ارزیابی، (۹) سناریوهای زلزله و (۱۰) تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در داده. شایان ذکر است به رغم طولانی بودن فرایند بررسی مقالات کامل، این کار مستقیماً توسط خود محققین انجام شد و در این زمینه کوچکترین استفاده ای از هوش مصنوعی صورت نگرفت.



شکل ۱- فرایند بررسی و انتخاب مقالات با رویکرد مرور نظام‌مند (ترسیم از نگارندگان)

Fig.1. Flowchart of the Systematic Review Process for Article Selection



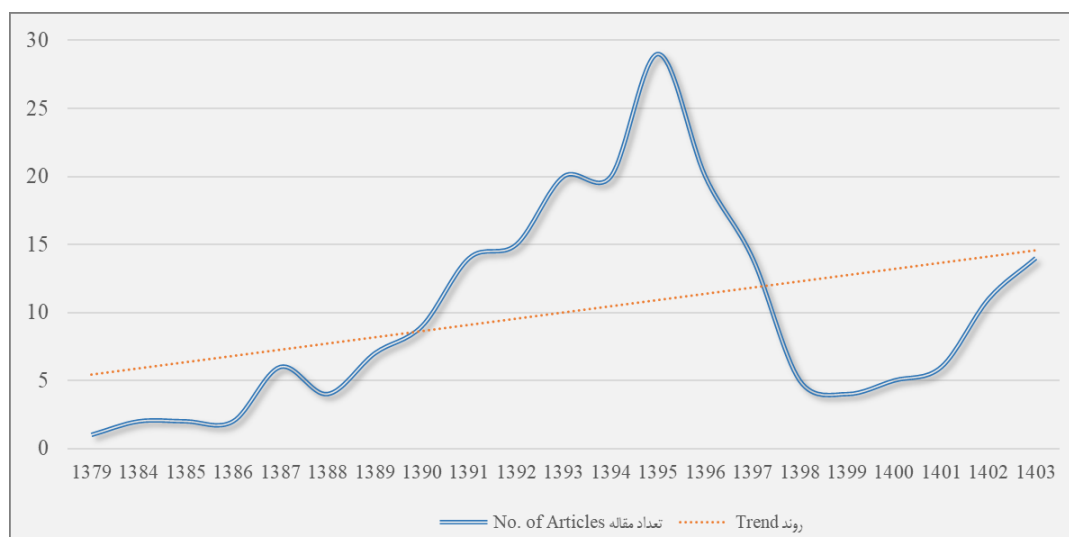
شکل ۲- نمونه‌ای از محیط کدگذاری و سازمان‌دهی داده‌ها در نرم‌افزار MAXQDA

Fig. 2. An example of the coding and data organization environment in MAXQDA

نتایج و بحث

روند انتشار مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران

روند انتشار مقالات فارسی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۳ نشان می‌دهد که تعداد پژوهش‌ها ابتدا تا دهه ۱۳۹۰ رشد آرامی داشته است، سپس با رشد قابل‌توجهی تا سال ۱۳۹۵ به اوج رسیده و پس از آن با کاهش چشمگیر مواجه شده است. در سال‌های اخیر نیز روند انتشار مقالات دوباره با افزایش نسبی همراه بوده است (شکل ۳). نقطه عطف این روند در میانه دهه ۱۳۹۰ به‌ویژه در سال‌های ۱۳۹۳ (۲۱ مقاله)، ۱۳۹۴ (۱۹ مقاله) و اوج آن در سال ۱۳۹۵ با ۳۰ مقاله شکل گرفت. این افزایش قابل‌توجه می‌تواند نتیجه عوامل متعددی، از جمله افزایش آگاهی عمومی نسبت به مخاطره زلزله، وقوع زلزله‌های مخرب، ارتقای ظرفیت‌های دانشگاهی و پژوهشی، پیشرفت در ابزارهای پژوهشی و گنجاندن موضوع مدیریت ریسک در برنامه‌های توسعه‌ای کشور باشد. به طور کلی، خط روند بلندمدت نیز تأیید می‌کند که به‌رغم نوسانات دوره‌ای، مسیر کلی رشد پژوهش در این حوزه صعودی بوده است. این روند بیانگر آن است که آسیب‌پذیری در برابر زلزله به‌تدریج به یکی از موضوعات مهم در حوزه‌های مدیریت بحران، برنامه‌ریزی شهری و روستایی در ایران تبدیل شده و مورد توجه روزافزون پژوهشگران قرار گرفته است.

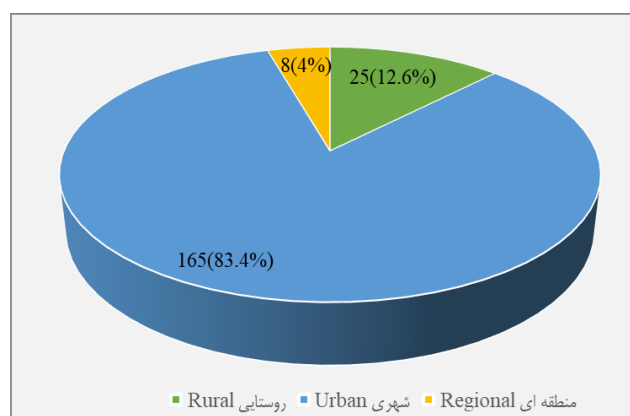


شکل ۳- روند انتشار مقالات حوزه ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران

Fig.3. Publication Trend of Studies on Earthquake Vulnerability Assessment in Iran

قلمرو جغرافیایی مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران

بر اساس قلمرو جغرافیایی (در سه گروه شهری، روستایی و منطقه‌ای)، ۸۳/۴ درصد از مطالعات انجام‌شده مناطق شهری، ۱۲/۶ درصد در مناطق روستایی و ۴ درصد نیز در سطح منطقه‌ای است (شکل ۴). بنابراین، توجه اصلی پژوهش بر مناطق شهری متمرکز بوده است. تمرکز بیشتر بر پژوهش در مناطق شهری ممکن است به دلیل اهمیت اقتصادی، اجتماعی، و زیرساختی این مناطق باشد. کمبود مطالعات در مناطق روستایی و ملی- منطقه‌ای می‌تواند منجر به فقدان شناخت و آگاهی از عوامل اصلی آسیب‌پذیری شود. بنابراین، توجه به مناطق روستایی و منطقه‌ای نیز برای درک و آگاهی از آسیب‌پذیری در برابر زلزله ضروری است.



شکل ۴- توزیع مقالات بر اساس قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

Fig.4. Distribution of Articles by Geographic Scope of the Study

توزیع جغرافیایی مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران

مبتنی بر توزیع جغرافیایی، مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران به‌شدت ناهمگن و متمرکز بر چند استان خاص بوده‌اند. حدود یک‌چهارم کل مطالعات در استان تهران (۲۶/۷ درصد) صورت گرفته که بیشترین سهم را دارد. پس از تهران، بیشترین توجه پژوهشی به استان‌های آذربایجان شرقی ۱۱/۴ درصد، فارس ۷/۴ درصد و کردستان ۵/۴ درصد معطوف شده است؛ به‌طورکلی، مجموعاً ۵۱ درصد از مطالعات در این چهار استان انجام شده است. در مقابل، بر اساس مطالعه وارد شده در مرور نظام‌مند حاضر، پنج استان کشور- بوشهر، سیستان و بلوچستان، ایلام، مرکزی و خراسان شمالی هیچ مطالعه موردی شناسایی‌شده‌ای در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله مطابق معیارهای ورود این پژوهش نداشته‌اند. لازم به تأکید است که این یافته به معنای نبود تمامی مطالعات مرتبط با زلزله در این استان‌ها نیست؛ بلکه مطالعاتی که در زمینه‌هایی مانند پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای، تحلیل لرزه‌خیزی، برآورد خطر زلزله یا بررسی تغییرات فیزیکی ناشی از رخداد زلزله انجام شده‌اند، در دامنه این مرور قرار نگرفته‌اند، زیرا هدف آن‌ها ارزیابی مؤلفه خطر یا پیامدهای فیزیکی زمین‌لرزه بوده و به سنجش آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر بر اساس شاخص‌ها و چارچوب‌های ارزیابی نمی‌پردازند.



شکل ۵- توزیع جغرافیایی مطالعات مورد بررسی

Fig.5. Geographic Distribution of the Reviewed Studies

این در حالی است که برخی از این استان‌ها، به‌ویژه بوشهر، سیستان و بلوچستان و ایلام، در پهنه‌های لرزه‌خیز قرار دارند و سابقه رخداد زلزله‌های مخرب در آن‌ها ثبت شده است. فقدان مطالعات در این استان‌ها، نشان‌دهنده شکاف قابل توجه در شناخت و ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در این مناطق است. به نظر می‌رسد توزیع جغرافیایی پژوهش‌ها بیش از آنکه بر اساس سطح ریسک

زلزله شکل گرفته باشد، تحت تأثیر عواملی مانند تمرکز دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، دسترسی به داده‌ها و ظرفیت‌های نهادی و محلی قرار داشته است (شکل ۵).

توزیع مقالات بر اساس مجلات

توزیع مقالات آسیب‌پذیری زلزله در ایران بر اساس مجلات نشان می‌دهد، از میان ۲۱۱ مقاله منتشرشده در ۱۰۱ مجله، ۵۸ مجله تنها یک مقاله منتشر کرده‌اند. تحلیل انتشار مقالات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در مجلات داخلی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مطالعات در چند مجله مشخص متمرکز بوده است؛ با این حال، تعداد زیادی از مقالات نیز در طیف متنوعی از مجلات منتشر شده‌اند که هر کدام سهم محدودی از مطالعات مورد بررسی را به خود اختصاص داده‌اند. مطالعات بیشتر در مجلات «مخاطرات محیط طبیعی» (۱۴ مقاله)، «مدیریت بحران» (۱۱ مقاله) و «اطلاعات جغرافیایی (سپهر)» (۹ مقاله) منتشر شده‌اند. علاوه بر این، مجلات تخصصی جغرافیا و برنامه‌ریزی مانند «جغرافیا و برنامه‌ریزی» (۷ مقاله)، «برنامه‌ریزی و آمایش فضا» (۶ مقاله) و «تحلیل فضایی مخاطرات محیطی» (۶ مقاله) سهم قابل توجهی دارند و بیانگر علاقه پژوهشگران به استفاده از رویکردهای فضایی و کاربرد GIS در تحلیل آسیب‌پذیری است.

درعین حال، طیف وسیعی از مجلات با یک یا دو مقاله منتشرشده وجود دارند که نشان می‌دهد که برخی مطالعات در حوزه‌های خاص یا میان‌رشته‌ای و به صورت پراکنده منتشر شده‌اند. همچنین، تعداد زیادی مجله با تنها یک مقاله نشان‌دهنده پراکندگی موضوعی و فقدان تمرکز کامل در یک مجله مرجع مشخص است. همچنین، مجلات بین‌رشته‌ای و موضوعی مانند «علوم و مهندسی زلزله»، «مهندسی سازه و ساخت»، «پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله» و «شهر ایمن» تنها چند مقاله در این زمینه منتشر کرده‌اند، که بیانگر محدود بودن پیوند میان پژوهش‌های علمی و نیازهای کاربردی است. در مجموع، بررسی توزیع مجلات نشان می‌دهد که ادبیات داخلی ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله هم بر ابزارها و رویکردهای فضایی تمرکز دارد و هم پراکنده و میان‌رشته‌ای منتشر شده است، بدون تمرکز کامل بر یک مجموعه نشریه تخصصی که انسجام علمی را تقویت کند (شکل ۶).



شکل ۶- توزیع مقالات بر اساس مجلات (مجلات با تعداد مقالات ≥ 3)

Fig.6. Distribution of Articles by Journal (Journals Publishing ≥ 3 Articles)

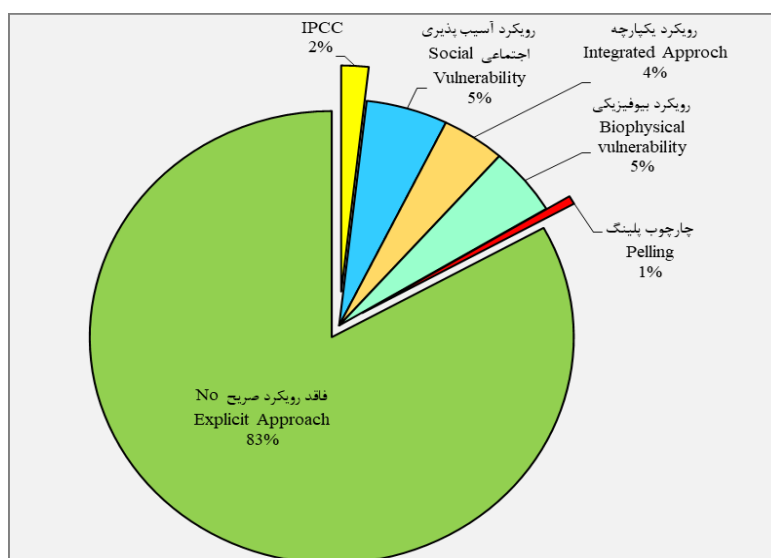
در یک تحلیل موضوعی، مجلات منتشرکننده مقالات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله را می‌توان در سه گروه اصلی علوم انسانی - اجتماعی (به‌ویژه جغرافیا و برنامه‌ریزی)، فنی - مهندسی و میان‌رشته‌ای طبقه‌بندی کرد. بیشترین سهم انتشار به مجلات حوزه جغرافیا و برنامه‌ریزی تعلق دارد که عمدتاً بر رویکردهای فضایی و برنامه‌ریزی تمرکز داشته و کمتر به تحلیل‌های سازه‌ای و مدل‌های مهندسی می‌پردازند. در مقابل، مجلات فنی-مهندسی با سهمی کمتر، به موضوعاتی مانند مدل‌سازی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، تحلیل سازه‌ای، منحنی‌های شکنندگی و سناریوهای تخریب می‌پردازند. مجلات میان‌رشته‌ای نیز بیشتر بر مدیریت بحران، تحلیل شاخص‌ها، مدل‌های تصمیم‌گیری و کاربرد GIS تمرکز دارند. بنابراین، بخش عمده ادبیات داخلی در مجلات جغرافیا و برنامه‌ریزی منتشر شده و غلبه رویکردهای غیرسازه‌ای و مبتنی بر GIS را در پژوهش‌های ایران نشان می‌دهد.

چارچوب‌های مفهومی مورداستفاده برای مفهوم‌سازی آسیب‌پذیری زلزله

بر اساس داده‌های حاصل از مرور نظام‌مند، از مجموع ۱۶۵ مطالعه بررسی‌شده، حدود ۸۳ درصد آن‌ها فاقد رویکرد نظری یا چارچوب مفهومی آشکار برای ارزیابی آسیب‌پذیری بودند (شکل ۷). این بدان معناست که بسیاری از پژوهش‌ها بدون اتکا به یک مبنای نظری مشخص انجام‌شده‌اند و صرفاً به تولید و ترکیب شاخص‌ها پرداخته‌اند. افزون بر این، اغلب این پژوهش‌ها نه تنها چارچوب‌های نظری معتبر بین‌المللی را معرفی نکرده‌اند، بلکه حتی تلاش اندکی برای توسعه یک چارچوب مفهومی بومی، متناسب با شرایط اجتماعی، اقتصادی و کالبدی ایران نیز انجام نداده‌اند.

چنین وضعیتی پیامدهای مهمی برای کیفیت تولید دانش در این حوزه دارد؛ در فقدان یک چارچوب روشن، انسجام تحلیلی کاهش می‌یابد و مشخص نیست شاخص‌ها بر اساس چه منطق مفهومی انتخاب‌شده‌اند یا چگونه قرار است بر یکدیگر اثر بگذارند. بنابراین پژوهش‌ها اگرچه اغلب چندبعدی هستند و از مجموعه‌ای از شاخص‌های کالبدی، اجتماعی، اقتصادی یا جمعیتی بهره می‌گیرند، اما این چندبعدی‌سازی بدون پشتوانه نظری انجام‌شده و فاقد ساختار مفهومی است که بتواند روابط، سازوکارها و منطق ترکیب این ابعاد را توضیح دهد. این وضعیت موجب می‌شود تحلیل‌ها بیشتر حالت عددی، رتبه‌بندی و توصیفی داشته باشند و قدرت تبیینی محدودی در توضیح چرایی و چگونگی شکل‌گیری آسیب‌پذیری پیدا کنند. همچنین، فقدان چارچوب نظری باعث افت قابلیت مقایسه میان مطالعات، دشواری در بازتولید روش‌شناسی و محدود شدن کاربرد سیاستی نتایج می‌شود، زیرا روشن نیست تحلیل‌ها بر چه مبنایی بنا شده‌اند و چگونه می‌توان آن‌ها را در زمینه‌های دیگر به کار برد.

در میان مطالعاتی که رویکرد مشخصی داشتند، رویکرد آسیب‌پذیری اجتماعی (۵ درصد) و رویکرد بیوفیزیکی (۵ درصد) بیشترین کاربرد را داشته‌اند. این امر نشان‌دهنده توجه نسبی پژوهشگران به ابعاد انسانی، ساختارهای اقتصادی - اجتماعی و ظرفیت‌ها و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و سازه‌ای مناطق زلزله‌خیز است. دیدگاه ترکیبی یا یکپارچه (۴ درصد) که توصیه می‌کنند ابعاد فیزیکی و اجتماعی هم‌زمان مورد تحلیل قرار گیرند، به‌طور محدود به کار رفته و بیانگر فاصله پژوهش‌های داخلی با استانداردهای بین‌المللی است. استفاده از چارچوب‌های جدیدتر بین‌المللی مانند رویکرد IPCC (۲ درصد) و چارچوب مفهومی پلینگ^۱ (۰/۱ درصد) نیز که از جمله مدل‌ها و چارچوب‌های چندبعدی محسوب می‌شوند، بسیار محدود بوده و نشان‌دهنده این نکته است که هنوز در ادبیات ایران جایگاه چندانی ندارند و تحلیل‌ها اغلب سطحی یا شاخص‌محور هستند. در مجموع، وضعیت موجود بیانگر آن است که ادبیات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران عمدتاً فاقد صراحت نظری، بدون چارچوب مفهومی بومی و کم‌ارتباط با مدل‌های بین‌المللی است.



شکل ۷- فراوانی مطالعات انجام شده بر اساس رویکرد آسیب پذیری در ایران

Fig.7. Frequency of studies conducted based on the vulnerability approach in Iran

ابعاد مختلف آسیب پذیری زلزله

آسیب پذیری در برابر زلزله مفهومی چندبعدی است که از برهم کنش عوامل کالبدی، اقتصادی- اجتماعی و طبیعی شکل می گیرد و شدت پیامدهای یک رویداد لرزه ای را در مقیاس های فضایی مختلف تعیین می کند. بررسی مطالعات انجام شده در ایران نشان می دهد که اگرچه بسیاری از پژوهش ها فاقد یک چارچوب نظری یا مفهومی مشخص هستند، اما در عمل از مجموعه گسترده ای از شاخص ها برای ارزیابی آسیب پذیری استفاده کرده اند. این شاخص ها در مطالعه مروری حاضر در سه بُعد اصلی یعنی بعد کالبدی با مجموع ۱۱۵۱ بار تکرار شاخص ها، بعد اقتصادی- اجتماعی با ۴۲۸ بار تکرار و بعد طبیعی با ۳۴۶ بار تکرار دسته بندی شدند. بررسی فراوانی شاخص های مورد استفاده نشان داد که در میان شاخص های پرتکرار، نوع مصالح ساختمانی با ۱۲۴ بار تکرار بیشترین سهم را داشته است. پس از آن، تراکم جمعیت با ۱۱۵ بار، سازگاری کاربری اراضی و فاصله از گسل هر کدام با ۹۵ بار، قدمت ساختمان با ۹۳ بار و تعداد طبقات ساختمان با ۷۲ بار تکرار در رتبه های بعدی قرار گرفته اند. چنین گستره ای از شاخص ها نشان می دهد که پژوهشگران تلاش کرده اند چشم اندازی چند بُعدی از آسیب پذیری ارائه دهند؛ با این حال از آنجا که بخش زیادی از این مطالعات فاقد چارچوب مفهومی مشخص هستند، انسجام نظری میان این ابعاد کمتر دیده می شود و شاخص ها بیشتر بر اساس دسترس پذیری داده یا موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه انتخاب شده اند تا پیروی از یک منطق مفهومی واحد.

این طبقه بندی سه گانه در این مطالعه نه تنها به شفاف سازی ساختار مفهومی آسیب پذیری کمک می کند، بلکه امکان مقایسه میان ابعاد مختلف را فراهم می سازد و نشان می دهد که در پژوهش های داخلی، کدام بعد بیشتر و کدام بعد کمتر مورد توجه بوده اند. در ادامه، هر یک از این ابعاد و مؤلفه های درونی آن ها و شاخص ها با جزئیات تحلیل می شود تا چشم اندازی روشن از جهت گیری مطالعات آسیب پذیری زلزله در ایران را ارائه دهد.

آسیب پذیری فیزیکی

شاخص های بُعد کالبدی- فیزیکی گسترده ترین و پرتکرارترین حوزه در ادبیات داخلی آسیب پذیری زلزله است؛ فراوانی بالای این بُعد نشان می دهد که بخش عمده پژوهش ها صرف نظر از دارا بودن/نبودن چارچوب نظری صریح، متکی بر تحلیل عوامل کالبدی بوده اند. شاخص های این بعد در قالب چند مؤلفه اصلی بررسی شده اند که فراوانی تکرار هر شاخص در مقالات تصویر روشنی از جهت گیری پژوهش های داخلی فراهم می کند. بزرگ ترین مؤلفه، ویژگی های ساختمان است که بیشترین فراوانی را در مطالعات داشته و در مجموع شاخص های آن ۳۹۷ بار در مقالات مختلف به کار رفته است. در میان شاخص های این مؤلفه، نوع مصالح با ۱۲۴ بار، قدمت ساختمان با ۹۳ بار، تعداد طبقات با ۷۲ بار و نوع اسکلت با ۷۱ بار استفاده، بیشترین فراوانی را دارند.

تکرار بسیار بالای این شاخص‌ها نشان می‌دهد که پژوهشگران داخلی بیش از هر چیز بر مقاومت سازه‌ای، کیفیت ساخت، فرسودگی و ارتفاع ساختمان‌ها تمرکز داشته‌اند. به بیانی روشن‌تر، «ساختمان» به‌عنوان نخستین سطح تماس مخاطره و جامعه، همچنان کانون اصلی این تحلیل‌هاست.

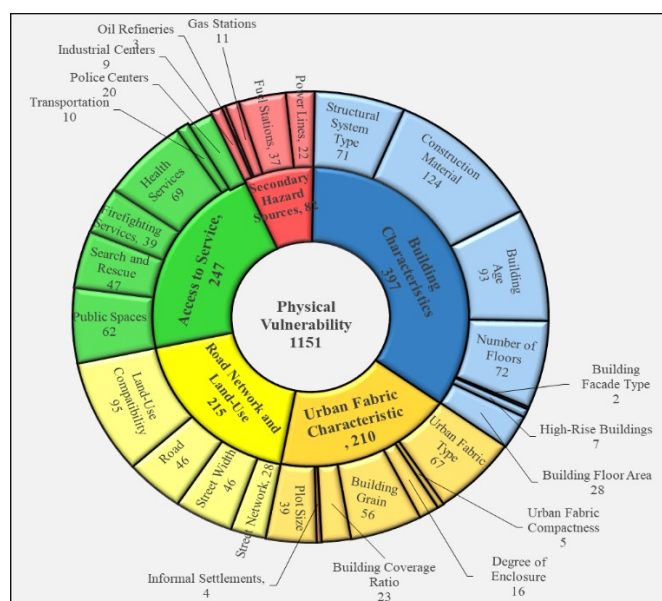
پس از آن، ویژگی‌های بافت شهری با ۲۱۰ بار تکرار شاخص‌های آن، دومین مؤلفه مهم است. شاخص‌هایی مانند نوع بافت (۶۷ بار)، دانه‌بندی ساختمان‌ها (۵۶ بار)، اندازه قطعات (۳۹ بار) و درجه محصوریت (۱۶ بار) نشان می‌دهد که پژوهش‌ها تنها به ساختمان محدود نمانده‌اند و ساختار فضایی بافت نیز در تحلیل آسیب‌پذیری نقش جدی داشته است. فراوانی این شاخص‌ها بیان می‌کند که پژوهشگران به رابطه میان فشردگی، نفوذپذیری و الگوی پراکنش ساختمان‌ها با شدت آسیب توجه داشته‌اند؛ زیرا یک بافت فشرده یا محصور- حتی اگر ساختمان‌ها مقاوم باشند- می‌تواند روند امدادسانی و پراکندگی خسارت را تحت تأثیر قرار دهد.

مؤلفه بعدی، شبکه راه و کاربری اراضی است که ۲۱۵ بار در مقالات مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص‌هایی مانند سازگاری کاربری اراضی (۹۵ بار)، عرض معبر (۴۶ بار) و فاصله از راه‌های ارتباطی (۴۶ بار) نشان می‌دهد که موضوع «دسترسی-پذیری» در هر دو مرحله پیش و پس از زلزله جزء نگرانی‌های اصلی پژوهشگران بوده است. این توجه بیانگر اهمیت تعیین‌کننده شبکه معابر، امکان عبور خودروهای امدادی، و نقش کاربری‌های ناسازگار در افزایش خطرپذیری محلات است. چهارمین مؤلفه، دسترسی به خدمات است که با ۲۴۷ مورد تکرار شده و نشان‌دهنده توجه به «ظرفیت واکنش خدمات شهری» در مطالعات است. شاخص‌هایی مانند فاصله از خدمات سلامت مانند بیمارستان‌ها و مراکز بهداشتی درمانی (۶۹ بار)، فاصله از فضاهای عمومی و سبز (۶۲ بار)، فاصله از مراکز امداد و نجات (۴۷ بار) و فاصله از ایستگاه‌های آتش‌نشانی (۳۹ بار) در جایگاه مهمی قرار دارند. تکرار زیاد این شاخص‌ها در مقالات نشان می‌دهد که پژوهشگران بر آن تأکید داشته‌اند که حتی اگر شدت تخریب کالبدی بالا نباشد، پراکندگی یا کمبود خدمات اضطراری می‌تواند میزان مرگ‌ومیر و خسارات ثانویه را افزایش دهد.

آخرین مؤلفه، منابع خطر ثانویه است که ۸۲ بار در مطالعات تکرار شده است. وجود شاخص‌هایی مانند فاصله از جایگاه سوخت (۳۷ بار)، فاصله از خطوط و پست برق (۲۲ بار) و فاصله از ایستگاه کاهش فشار گاز (۱۱ بار) بیانگر آن است که پژوهشگران به‌خوبی خطرات زنجیره‌ای پس از زلزله را درک کرده‌اند. اهمیت این مؤلفه در این است که هرچند فراوانی آن نسبت به سایر مؤلفه‌ها کمتر است، اما وزن پیامدهای آن در صورت وقوع بسیار بالاست. در مجموع، فراوانی شاخص‌ها نشان می‌دهد که بعد کالبدی- فیزیکی در پژوهش‌های داخلی به‌طور گسترده پوشش داده شده است. تکرار بالای شاخص‌های ساختمانی، بافت شهری، شبکه معابر، خدمات و منابع خطر ثانویه نشان‌دهنده نگاه نسبتاً جامع پژوهشگران به محیط ساخته‌شده است (شکل ۸).

آسیب‌پذیری اقتصادی- اجتماعی

بُعد اقتصادی- اجتماعی دومین بُعد پرکاربرد در ادبیات داخلی آسیب‌پذیری زلزله است و مجموعاً شاخص‌های این بُعد ۴۲۸ با در مقالات مختلف تکرار شده است. این شاخص‌ها در قالب مؤلفه‌های اصلی دسته‌بندی شده‌اند که هرکدام ابعاد متفاوتی از جمعیت، اقتصاد و سرمایه اجتماعی را پوشش می‌دهند. مؤلفه نخست، ویژگی‌های جمعیتی است که شاخص‌های آن با ۲۸۶ بار تکرار، بیشترین سهم را دارد. شاخص‌هایی مانند تراکم جمعیت (۱۱۵ بار)، درصد سالخوردگان (۲۲ بار)، درصد کودکان (۲۴ بار)، نسبت جنسی (۲۵ بار) و تراکم مسکونی (۲۹ بار) نشان می‌دهند که پژوهشگران بیش از هر چیز بر ساختار جمعیت و گروه‌های آسیب‌پذیر تمرکز کرده‌اند. این شاخص‌ها ارتباط مستقیم با میزان افراد در معرض خطر، تقاضای خانوارها برای مقابله با زلزله و تقاضای خدمات امدادی دارند (شکل ۹).

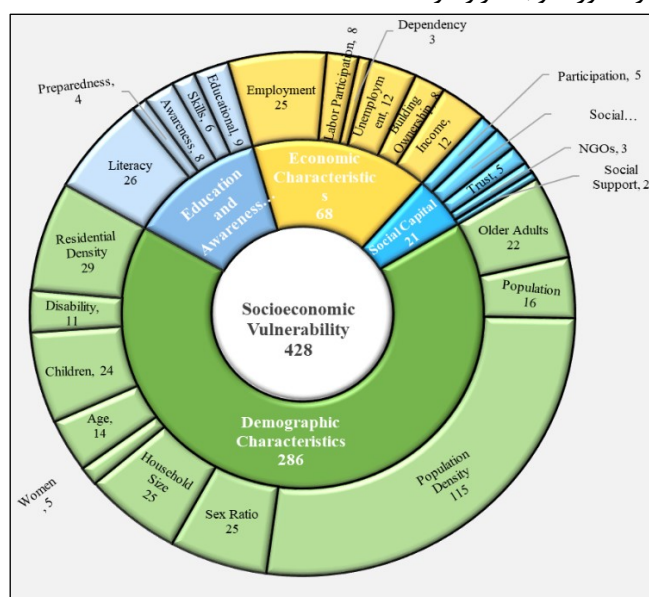


شکل ۸- شاخص‌های مؤلفه آسیب‌پذیری کالبدی- فیزیکی

Fig.8. Indicators of the Physical-Structural Vulnerability Component

آسیب‌پذیری طبیعی

بُعد طبیعی سومین بُعد موردبررسی در ادبیات داخلی ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله است و شاخص‌های آن در مجموع ۳۴۶ بار در مطالعات مختلف تکرار شده است. این شاخص‌ها در قالب مؤلفه‌های اصلی دسته‌بندی شده‌اند که هر کدام بخشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، لرزه‌خیزی و هیدرولوژی محیط طبیعی را منعکس می‌کنند. مؤلفه نخست، لرزه‌خیزی و گسل‌ها است که مجموع شاخص‌های آن ۱۵۴ بار تکرار شده است که بیشترین سهم را در بُعد طبیعی دارد. شاخص‌هایی مانند فاصله از گسل (۹۵ بار)، فاصله از کانون زلزله‌های تاریخی (۲۲ بار)، تعداد وقوع زلزله (۱۹ بار) و بیشینه شتاب زمین (PGA) (۱۱ بار) نشان‌دهنده توجه مطالعات به ویژگی‌های لرزه‌ای و شرایط طبیعی مؤثر بر تفاوت مکانی آسیب‌پذیری در برابر زلزله است. تکرار این شاخص‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های لرزه‌ای و شرایط طبیعی محیط، در بخش قابل توجهی از مطالعات به‌عنوان عوامل مؤثر بر ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله مورد توجه قرار گرفته‌اند.



شکل ۹- شاخص‌های مؤلفه آسیب‌پذیری اقتصادی- اجتماعی

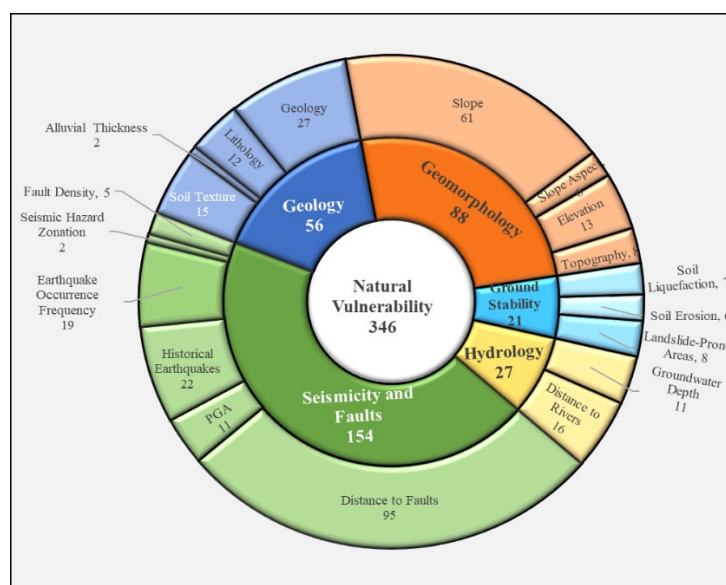
Fig. 9. Indicators of the Socioeconomic Vulnerability Component

مؤلفه دوم، زمین‌شناسی است به ویژگی‌های خاک و سنگ زیرساختی منطقه مربوط می‌شود و مجموع شاخص‌های آن ۵۶ بار تکرار شده است. شاخص‌هایی مانند بافت خاک (۱۵ بار)، سنگ‌شناسی (۱۲ بار)، زمین‌شناسی (۲۷ بار) و ضخامت آبرفت (۲ بار) بیانگر این است که ویژگی‌های زمین و خاک بر رفتار زمین در هنگام زلزله، از جمله نشست، ترک‌خوردگی و حرکت‌های ثانویه تأثیر مستقیم دارند. مؤلفه سوم، ژئومورفولوژی با ۸۸ بار تکرار، ابعاد توپوگرافی و شکل زمین را نشان می‌دهد. شاخص‌هایی مانند شیب (۶۱ بار)، ارتفاع (۱۳ بار)، جهت شیب (۶ بار) و توپوگرافی (۸ بار) اهمیت ویژگی‌های سطح زمین و نحوه توزیع آن را در شدت اثر زلزله و وقوع رانش‌ها نشان می‌دهند. این شاخص‌ها بیانگر آن است که تحلیل خطر تنها به سازه و جمعیت محدود نمی‌شود، بلکه عوامل طبیعی محیط نیز نقش مهمی دارند.

مؤلفه‌های چهارم و پنجم، شامل هیدرولوژی و پایداری زمین است مجموعاً ۴۸ بار تکرار شده است. شاخص‌هایی مانند روانگرایی خاک (۷ بار)، فرسایش خاک (۶ بار)، نقاط لغزشی (۸ بار)، سطح ایستابی آب (۱۱ بار) و فاصله از رودخانه (۱۶ بار) نشان می‌دهد که شرایط محیطی مانند لغزش زمین، روانگرایی و خطر سیلاب‌های ناشی از زلزله در تحلیل‌های آسیب‌پذیری طبیعی مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است (شکل ۱۰).

رویکردها و روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری در پژوهش‌های داخلی

پس از بررسی تعاریف، ابعاد و چارچوب‌های مفهومی آسیب‌پذیری در ادبیات داخلی، گام بعدی بررسی این است که پژوهشگران چگونه این مفهوم را به صورت عملیاتی در روش‌های ارزیابی پیاده‌سازی کرده‌اند. در واقع، فراتر از نوع دیدگاه یا رویکرد نظری، آنچه سرنوشت یک پژوهش را در ارزیابی آسیب‌پذیری تعیین می‌کند، چگونگی انتخاب شاخص‌ها، نحوه نرمال‌سازی داده‌ها، روش وزن‌دهی، و در نهایت روش ارزیابی، تجمیع و ساخت شاخص ترکیبی آسیب‌پذیری است که در ادامه هرکدام به شرح داده شده است.



شکل ۱۰- شاخص‌های مؤلفه آسیب‌پذیری طبیعی

Fig. 10. Indicators of the Natural Vulnerability Component

روش‌های نرمال‌سازی شاخص‌های آسیب‌پذیری

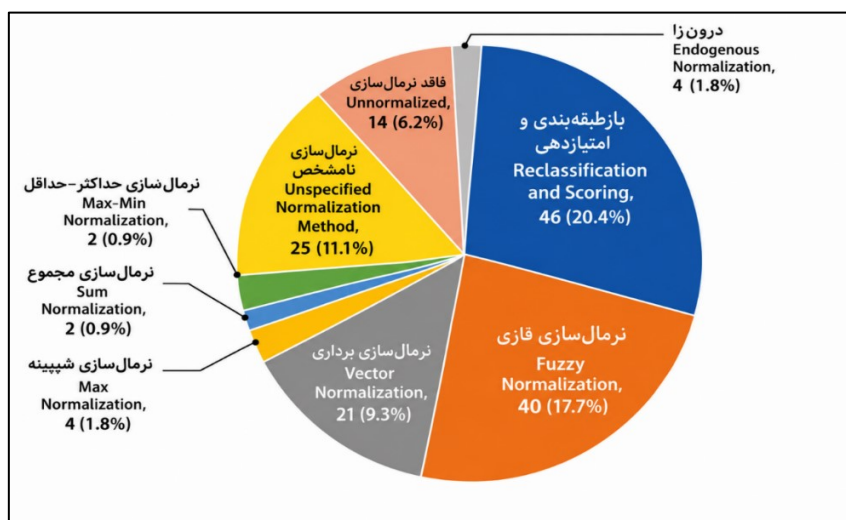
نرمال‌سازی شاخص‌ها یکی از مراحل کلیدی در فرآیند شاخص‌سازی و ارزیابی کمی آسیب‌پذیری است و نحوه انجام آن می‌تواند بر نتایج نهایی اثر قابل توجهی داشته باشد. پژوهشگران برای تبدیل شاخص‌ها به مقیاس مشترک، از مجموعه‌ای گسترده از روش‌ها استفاده کرده‌اند. به طور کلی، روش بازطبقه‌بندی و امتیازدهی با ۲۸ درصد (۴۶ مورد) بیشترین فراوانی را در میان مطالعات دارد. این روش عمدتاً در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و به ویژه در لایه‌های رستری به کار رفته است؛ یعنی

پژوهشگران لایه‌ها را بازطبقه‌بندی کرده و به هر طبقه امتیازی مشخص (مثلاً ۱ تا ۵ یا ۱ تا ۹) داده‌اند تا داده‌ها قابلیت استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری را پیدا کنند. گرچه این روش ساده و منعطف است اما انتخاب تعداد طبقات و امتیازها معمولاً ذهنی و وابسته به قضاوت پژوهشگر است و همین امر می‌تواند بر دقت و قابلیت مقایسه نتایج اثر بگذارد.

نرمال‌سازی فازی با ۲۴ درصد (۴۰ مورد)، دومین روش پرتکرار محسوب می‌شود. این روش به‌ویژه زمانی مفید است که شاخص‌ها دارای مرزهای نادقیق و مبهم باشند زیرا امکان مدل‌سازی پیوسته عدم قطعیت و درجه عضویت شاخص‌ها را فراهم می‌سازد. در اغلب مطالعات، در نرمال‌سازی فازی از تابع عضویت خطی استفاده شده است. استقبال نسبتاً زیاد از روش فازی نشان می‌دهد که پژوهشگران تلاش کرده‌اند از محدودیت‌های امتیازدهی گسسته فاصله گرفته و به سمت نرمال‌سازی‌های انعطاف‌پذیرتر حرکت کنند. پس از این دو روش، نرمال‌سازی برداری با ۱۳ درصد (۲۱ مورد) قرار دارد که عمدتاً در چارچوب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. روش‌های کم‌کاربردتری مانند نرمال‌سازی حداکثر-حداقل (۵ درصد)، نرمال‌سازی بر اساس بیشینه (۳ درصد)، نرمال‌سازی مجموع (۱ درصد) و روش‌های درون‌زای مدل (۲ درصد، مانند PCA نرمال‌سازی جداگانه انجام نمی‌شود) نیز مشاهده می‌شود که سهم کمی دارند.

بخش مهمی از مطالعات نیز ابهام در روش نرمال‌سازی داشته‌اند (۲۵ مورد)، به این معنا که اگرچه شاخص‌ها ترکیب شده‌اند، اما نحوه تبدیل آن‌ها به مقیاس یکسان به‌درستی گزارش نشده یا صرفاً به‌طور ضمنی انجام شده است. علاوه بر آن، ۱۴ مطالعه نیز فاقد هرگونه نرمال‌سازی بوده‌اند؛ در این پژوهش‌ها شاخص‌ها صرفاً توصیف‌شده و هیچ ترکیب یا مقیاس‌بندی یکسانی انجام نگرفته است. این وضعیت معمولاً در مطالعات اولیه متداول بوده و نشان‌دهنده این است که پژوهشگران در آن زمان بیشتر بر شناسایی و ثبت شاخص‌ها تمرکز داشته‌اند و هنوز رویکردی نظام‌مند برای ترکیب شاخص‌ها و تحلیل کمی وجود نداشته است که منجر به برداشت‌های توصیفی و محدود از شاخص‌ها شده است.

در مجموع، تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه بخشی از ادبیات داخلی به سمت استفاده از روش‌های دقیق‌تر مانند نرمال‌سازی فازی یا برداری حرکت کرده اما هنوز غلبه با روش‌های ساده، شهودی و غالباً فاقد پشتوانه نظری قوی است؛ به‌ویژه روش بازطبقه‌بندی و امتیازدهی که بیشترین استفاده را دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- روش‌های نرمال‌سازی شاخص‌های آسیب‌پذیری

Fig.11. Methods for Normalizing Vulnerability Indicators

روش‌های وزن‌دهی به شاخص‌های آسیب‌پذیری

برای وزن‌دهی شاخص‌های آسیب‌پذیری زلزله در مطالعات داخلی، روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی شاخص‌ها به کاررفته است که شامل دو دسته داده محور و کارشناسی/خبره‌محور می‌شود؛ علاوه بر این پژوهش‌هایی نیز فاقد وزن‌دهی یا ابهام در روش وزن‌دهی نیز وجود داشت.

- روش‌های داده‌محور/ عینی: این روش‌ها بر اساس تحلیل داده‌های موجود و محاسبات آماری وزن شاخص‌ها را تعیین می‌کنند و کمتر وابسته به نظر کارشناسان هستند. مجموعاً ۱۴ مورد (۸.۵ درصد) از پژوهش انتخاب وزن‌ها داده محور بوده است. پرکاربردترین روش‌ها در این دسته شامل آنتروپی شانون (۸ مورد)، CRITIC (۴ مورد) و PCA (۲ مورد) هستند. استفاده از این روش‌ها نشان‌دهنده تلاش پژوهشگران برای تعیین وزن‌ها بر اساس اطلاعات واقعی و کاهش سوگیری ذهنی است، هرچند سهم آن‌ها در ادبیات داخلی نسبتاً اندک است.
 - روش‌های کارشناسی/ ذهنی: پرکاربردترین دسته، روش‌های مبتنی بر نظر متخصصان و کارشناسان است که غالباً با رویکردهای چندمعیاره و سلسله‌مراتبی است. در این دسته، مجموعاً ۱۱۹ مورد (۷۱ درصد) با استفاده از روش‌های کارشناسی یا خبره‌محور شاخص‌های آسیب‌پذیری را وزن‌دهی کرده‌اند. در این دسته، AHP (۶۱ مورد/ ۳۷ درصد) بیشترین فراوانی را دارد و پس از آن ANP (۲۰ مورد/ ۱۲ درصد)، IHWP/MIHWP (۱۳ مورد)، Fuzzy-AHP (۹ مورد)، Fuzzy-ANP (۲ مورد)، DEMATEL (۳ مورد)، Delphi (۸ مورد) و Fooler (۱ مورد) مشاهده می‌شوند. این روش‌ها به پژوهشگران امکان می‌دهند تا وزن شاخص‌ها را با در نظر گرفتن روابط پیچیده بین آن‌ها و شدت تأثیرشان بر آسیب‌پذیری تعیین کنند. استفاده از روش‌های فازی و ترکیبی (مثل Fuzzy-AHP و Fuzzy-ANP) نشان‌دهنده توجه به عدم قطعیت و ابهام در نظرات کارشناسان است، هرچند در عمل کمتر به کار رفته‌اند.
 - فاقد وزن‌دهی: در ۲۷ مورد (۱۶/۴ درصد)، شاخص‌ها هیچ وزن‌دهی خاصی صورت نگرفته است. این وضعیت معمولاً در پژوهش‌های اولیه متداول بوده و بیانگر تمرکز بیشتر بر شناسایی و ثبت شاخص‌ها بدون تحلیل کمی اهمیت نسبی آن‌ها است.
 - ابهام در روش وزن‌دهی: در ۵ مورد از مطالعات روش وزن‌دهی مبهم بوده است؛ به عبارت دیگر، در مطالعات موردبررسی، توضیح دقیق و مستند از فرآیند تعیین وزن‌ها ارائه نشده است.
- تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌ها بر روش‌های کارشناسی تکیه دارند و استفاده از روش‌های داده‌محور نسبتاً محدود است. همچنین، بخش قابل توجهی از مطالعات یا فاقد وزن‌دهی بوده‌اند یا روش به کار رفته مبهم و بدون شفافیت کافی گزارش شده است (شکل ۱۲).

روش‌های ارزیابی یا ساخت شاخص ترکیبی آسیب‌پذیری

ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران با طیف وسیعی از روش‌ها انجام شده است. روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران را می‌توان بر اساس ماهیت روش‌ها به دو دسته اصلی تقسیم کرد:

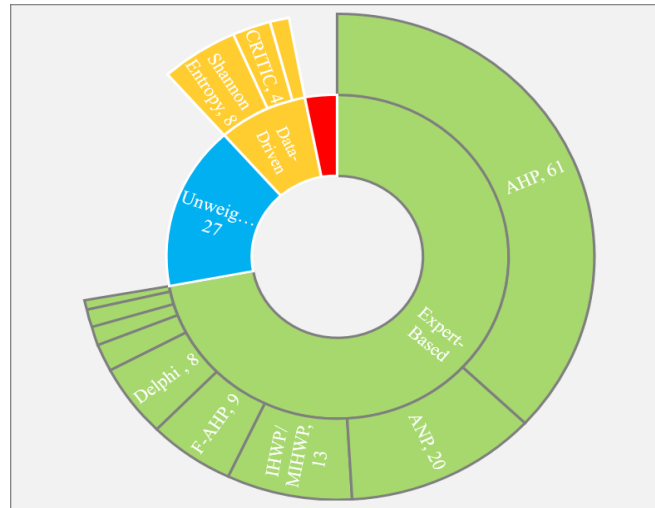
روش‌های ارزیابی شاخص ترکیبی آسیب‌پذیری زلزله

این دسته شامل روش‌هایی است که مجموعه‌ای از شاخص‌ها پس از نرمال‌سازی و وزن‌دهی در قالب یک نمایه نهایی آسیب‌پذیری تلفیق می‌شوند. بر اساس داده‌های مندرج در شکل (۱۳)، بخش غالب مطالعات داخلی به روش‌های شاخص ترکیبی تعلق دارد.

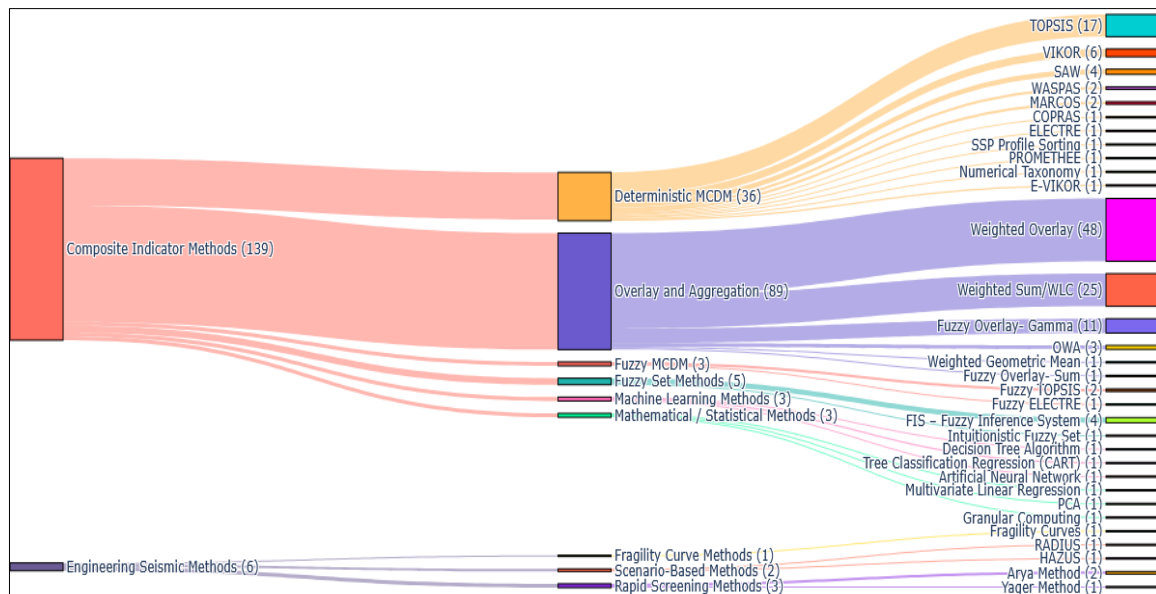
روش‌های مهندسی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای

روش‌های مهندسی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای برخلاف رویکردهای شاخص‌محور که بر ترکیب شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی، کالبدی و طبیعی تکیه دارند، مستقیماً بر رفتار واقعی سازه‌ها، منحنی‌های خسارت، ظرفیت باربری، تحلیل‌های غیرخطی و سناریوهای لرزه‌ای استوارند. این دسته سهم کمتری از ادبیات داخلی را تشکیل می‌دهد اما برآورد دقیق‌تری را از رفتار واقعی سازه‌ها در برابر زلزله ارائه می‌کند (باید متذکر شد که روش‌های این دسته، برای سازه‌های خاص یا تیپ خاص ساختمان‌ها به کار رفته‌اند اما در اینجا مطالعاتی که در سطح منطقه شهری یا وسیع انجام شده، مدنظر بوده است). رویکرد مهندسی مبتنی بر پارامترهای فنی سازه، خصوصیات مصالح، شکل‌پذیری، سختی، سناریوهای شدت زلزله و تحلیل رفتار غیرخطی

ساختمان‌هاست. اگرچه این روش‌ها از نظر علمی قوی‌تر هستند، اما به دلیل نیاز به داده‌های دقیق سازه‌ای، زمان‌بر بودن ارزیابی میدانی، و هزینه‌های مدل‌سازی، فراوانی آن‌ها در ایران بسیار کمتر از روش‌های شاخص ترکیبی است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲- روش‌های وزن‌دهی شاخص‌های آسیب‌پذیری
Fig.12. Methods for Weighting Vulnerability Indicators



شکل ۱۳- روش‌های ارزیابی/ساخت شاخص‌های ترکیبی آسیب‌پذیری
Fig.13. Methods for Assessing/Constructing Composite Vulnerability Indices

تهیه نقشه آسیب‌پذیری و روش‌های تحلیل فضایی

امروزه، یکپارچه سازی داده فضایی و تحلیل فضایی به روشی مرسوم در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری تبدیل شده‌است. در بسیاری از موارد، ارزیابی آسیب‌پذیری مترادف با ارزیابی آسیب‌پذیری فضایی^۱ در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا آسیب‌پذیری و مولفه‌های آن درجات بالایی از ناهمگنی فضایی و زمانی را نشان می‌دهند. بررسی مقالات نشان می‌دهد سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) یکی از پرکاربردترین ابزارها بوده که با تلفیق لایه‌های مختلف داده امکان تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری را فراهم کرده و در ۹۷ درصد از مطالعات به کار رفته‌است. با این حال، یکی از ضعف‌های اساسی در مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران،

فقدان بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته تحلیل فضایی است. اگرچه تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری رویکردی رایج و مرسوم بوده، اما این نقشه‌ها عمدتاً بر تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS تکیه داشته‌اند و کمتر از ظرفیت واقعی تحلیل فضایی استفاده کرده‌اند.

بررسی یافته‌ها نشان می‌دهد که تنها پنج مطالعه از روش‌های تحلیل فضایی از جمله خودهمبستگی فضایی سراسری و تحلیل لکه داغ برای شناسایی الگوهای فضایی آسیب‌پذیری بهره برده‌اند. این کمبود نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از تحقیقات، بدون تحلیل ساختار فضایی و بدون سنجش معناداری الگوهای فضایی، به ارائه نقشه‌هایی بسنده کرده‌اند. در نتیجه، غنای تحلیلی مطالعات کاهش یافته و بسیاری از الگوهای مهم خوشه‌بندی، تمرکز جغرافیایی، یا نابرابری‌های فضایی که در سیاست‌گذاری و مدیریت ریسک نقش کلیدی دارند، شناسایی نشده‌اند. این ضعف روش‌شناختی نشان می‌دهد که پژوهش‌های آینده باید فراتر از تولید نقشه رفته و از طیف گسترده‌تری از روش‌های تحلیل فضایی برای درک دقیق‌تر و علمی‌تر پویایی‌های فضایی آسیب‌پذیری استفاده کنند.

مقیاس جغرافیایی

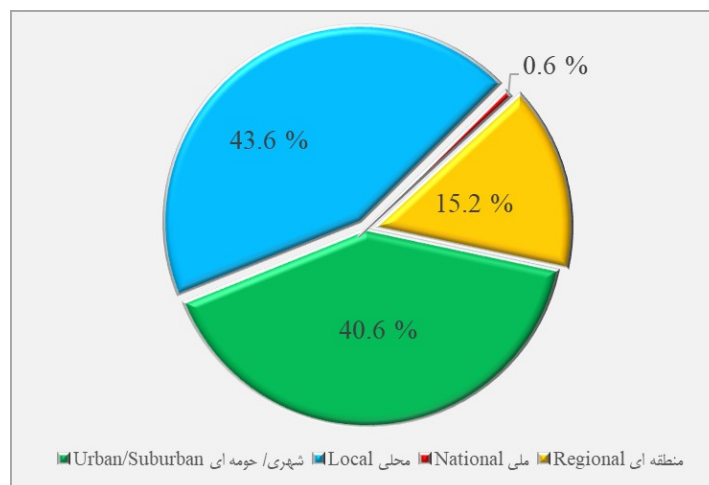
مقیاس جغرافیایی یکی از عوامل کلیدی در تعیین فرایندهایی است که آسیب‌پذیری را شکل می‌دهند. انتخاب مقیاس تحلیل، مستقیماً بر نوع داده‌های قابل استفاده، میزان دقت ارزیابی و امکان شناسایی عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری اثر می‌گذارد. از این رو، مطالعات آسیب‌پذیری معمولاً در چند سطح اصلی شامل ملی، منطقه‌ای، شهری/حومه‌ای و محلی طبقه‌بندی می‌شوند. در این طبقه‌بندی، مقیاس ملی به مطالعاتی اشاره دارد که آسیب‌پذیری را در سطح کشور بررسی یا آسیب‌پذیری کشورهای مختلف را با یکدیگر مقایسه می‌کنند. مقیاس منطقه‌ای به مطالعاتی اطلاق می‌شود که در سطحی پایین‌تر از کشور و معمولاً در محدوده‌ای بزرگ‌تر از یک شهر انجام می‌شوند؛ برای مثال، استان، شهرستان یا پهنه‌های جغرافیایی شامل چندین سکونتگاه. مقیاس شهری/حومه‌ای شامل مطالعاتی است که در سطح یک شهر، حومه شهر یا واحدهای جغرافیایی کوچک‌تر از شهر انجام می‌شوند. در مقابل، مقیاس محلی به مطالعاتی اشاره دارد که آسیب‌پذیری یک جامعه یا مکان مشخص را در محدوده‌ای بسیار محدود بررسی می‌کنند؛ این محدوده می‌تواند یک محله، یک سکونتگاه مشخص، گروهی از روستاهای مجاور یا حتی سطح خانوار باشد. بنابراین، مرز اصلی میان مقیاس شهری/حومه‌ای و محلی، در این پژوهش بر اساس واحد جغرافیایی و دامنه فضایی مطالعه تعیین شده است؛ به‌گونه‌ای که مطالعات در سطح کلی شهر یا حومه آن در گروه شهری/حومه‌ای و مطالعات متمرکز بر یک جامعه، محله، سکونتگاه یا محدوده محلی مشخص در گروه محلی قرار گرفته‌اند (Tonmoy, 2013).

همانطور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد، بخش عمده مطالعات در مقیاس‌های خرد انجام شده‌اند. حدود ۴۳/۶ درصد از مقالات در مقیاس محلی و حدود ۴۰/۶ درصد در مقیاس شهری/حومه‌ای قرار دارند؛ بنابراین ۸۴ درصد پژوهش‌ها بر واحدهای فضایی خرد مانند محله‌ها، مجموعه‌ای از روستاها، مناطق درون‌شهری یا یک شهر خاص متمرکز بوده‌اند. در مقابل، مطالعات در مقیاس منطقه‌ای سهم کمتری (حدود ۱۵ درصد) دارند و پژوهش‌های ملی تقریباً بسیار محدود بوده‌اند (کمتر از یک درصد). این الگو نشان می‌دهد که در ادبیات داخلی، تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر تحلیل‌های خرد و محلی است و مطالعات در مقیاس‌های کلان‌تر که امکان مقایسه گسترده‌تر و پشتیبانی از سیاست‌گذاری در سطح ملی را فراهم می‌کنند، نسبتاً کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

سناریوهای زلزله

در مرور مقالات فارسی مرتبط با ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران، یکی از محورهای مورد توجه، استفاده از سناریوهای مختلف زلزله در فرایند تحلیل بوده‌است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که حدود ۱۰/۹ درصد از رویکرد سناریومحور در ارزیابی‌های خود استفاده کرده‌اند. در این مطالعات، سناریوها معمولاً برای شبیه‌سازی پیامدهای زمین‌لرزه‌های فرضی با شدت‌ها یا بزرگی‌های متفاوت به کار گرفته شده‌اند تا میزان آسیب‌پذیری مناطق مورد مطالعه در شرایط مختلف ریسک بررسی شود. برخی از این پژوهش‌ها، سناریوهای مبتنی بر شدت یا بزرگی زلزله را در نظر گرفته و تلاش کرده‌اند اثر آن را بر میزان آسیب‌پذیری یا خسارت‌های احتمالی تحلیل کنند. علاوه بر این، در تعدادی از مطالعات نیز سناریوهای پیامدمحور مورد توجه قرار گرفته‌است؛ به‌گونه‌ای که پژوهشگران با استفاده از مدل‌ها یا داده‌های موجود، میزان تخریب ساختمان‌ها و تلفات انسانی احتمالی را در صورت

وقوع زلزله‌های فرضی برآورد کرده‌اند. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سناریوهای زلزله در میان پژوهش‌های فارسی هنوز نسبتاً محدود است و بخش قابل توجهی از مطالعات بیشتر بر ارزیابی وضعیت موجود آسیب‌پذیری تمرکز داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که توسعه رویکردهای سناریومحور، به‌ویژه سناریوهای مرتبط با شدت زلزله، میزان تخریب و تلفات انسانی، می‌تواند به درک دقیق‌تر پیامدهای بالقوه زلزله و پشتیبانی بهتر از برنامه‌ریزی کاهش ریسک و مدیریت بحران کمک کند.



شکل ۱۴- توزیع مقالات بر اساس مقیاس جغرافیایی مورد مطالعه

Fig.14. Distribution of Articles by Geographic Scale of the Study

تحلیل حساسیت

در هر مرحله از فرآیند ساخت شاخص- از انتخاب شاخص‌ها، مقیاس تحلیل، خطاهای اندازه‌گیری^۱، تبدیل داده‌ها، نرمال‌سازی، انتخاب مؤلفه‌ها در تحلیل مؤلفه‌های اصلی تا وزن‌دهی- تصمیم‌گیری‌ها می‌تواند بر نتایج نهایی تأثیر بگذارد (Tate, 2012). بسیاری از مطالعات، هنگام ساخت شاخص‌های آسیب‌پذیری، به پیامدهای آماری انتخاب روش خود توجه کافی نکرده‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که در حوزه ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله، توجه بسیار کمی به ارزیابی کیفیت و استحکام مدل‌ها شده است؛ به‌طوری‌که تنها در دو مطالعه، تحلیل حساسیت انجام شده و هر دو نیز از روش تحلیل حساسیت مرحله‌به‌مرحله (OAT)^۲ استفاده کرده‌اند و فقط یک مقاله به بررسی عدم قطعیت پرداخته است. این کمبود نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مطالعات، بدون آزمون استحکام مدل‌ها، به ارائه شاخص‌ها و نقشه‌های آسیب‌پذیری بسنده کرده‌اند. نادیده گرفتن این موضوع ممکن است به نتایج تحریف‌شده منجر شود. همچنین، برخی شاخص‌ها ممکن است با یکدیگر هم‌خطی^۳ داشته باشند؛ یعنی آن‌قدر مشابه یا همبسته باشند که عملاً یک چیز را دوباره اندازه‌گیری کنند. این مشکل باعث می‌شود وزن واقعی برخی عوامل بیشتر از آنچه باید در شاخص نهایی تأثیر بگذارد، و دقت تحلیل کاهش یابد. این بی‌توجهی به مسائل آماری، یک ضعف رایج در مطالعات آسیب‌پذیری بوده است.

مرور نظام‌مند مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران نشان می‌دهد که اگرچه طی دو دهه گذشته توجه پژوهشگران به این حوزه افزایش قابل توجهی داشته است، اما ادبیات موجود همچنان با مجموعه‌ای از چالش‌های نظری، روش‌شناختی و مفهومی مواجه است. یکی از مهم‌ترین کاستی‌های شناسایی‌شده، فقدان مبانی نظری و چارچوب‌های مفهومی منسجم در بخش قابل توجهی از مطالعات است. بسیاری از پژوهش‌ها بدون ارائه تعریف مشخص و صریحی از مفهوم آسیب‌پذیری، به انتخاب و ترکیب مجموعه‌ای از شاخص‌ها پرداخته‌اند. در چنین شرایطی، انتخاب شاخص‌ها در برخی مطالعات بیشتر تحت تأثیر دسترسی به داده‌ها یا قابلیت

1 - Measurement Errors

2 - One-at-a-Time

3 - Co-linearity

اندازه‌گیری متغیرها بوده و ارتباط آن‌ها با ابعاد نظری آسیب‌پذیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه، بخش قابل توجهی از مطالعات به تولید شاخص‌های ترکیبی، رتبه‌بندی مناطق و تهیه نقشه‌های توزیع فضایی محدود شده‌اند، در حالی که آسیب‌پذیری مفهومی چندبعدی، زمینه‌محور و پویا است و ارزیابی آن نیازمند پیوند میان چارچوب نظری، انتخاب شاخص‌ها و روش تحلیل است. از این رو، بیرکمن (Birkmann, 2006) و بیرکمن و همکاران (Birkmann et al., 2013) بر ضرورت استفاده از چارچوب‌های مفهومی مشخص برای هدایت انتخاب شاخص‌ها و افزایش قابلیت تفسیر نتایج ارزیابی‌های آسیب‌پذیری تأکید کرده‌اند.

یافته‌های این پژوهش همچنین نشان‌دهنده عدم توازن فضایی در توزیع مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران است. بخش قابل توجهی از مطالعات در تعداد محدودی از استان‌ها، به‌ویژه تهران، متمرکز شده‌اند، در حالی که برخی مناطق کشور با وجود قرارگیری در پهنه‌های لرزه‌خیز و تجربه رخداد‌های تاریخی زلزله، سهم محدودی از مطالعات علمی را به خود اختصاص داده‌اند. این الگوی پراکنش نشان می‌دهد که توزیع مطالعات الزاماً با الگوی فضایی مخاطره زلزله منطبق نبوده است. به نظر می‌رسد عواملی مانند تمرکز دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، دسترسی به داده‌ها، ظرفیت‌های علمی و امکانات نهادی، در شکل‌گیری تمرکز جغرافیایی پژوهش‌ها نقش مهمی داشته‌اند. از این منظر، تمرکز مطالعات در مناطق دارای دسترسی بیشتر به منابع علمی، اگرچه می‌تواند موجب توسعه دانش در این مناطق شود، اما ممکن است شناخت از ناهمگنی فضایی آسیب‌پذیری در سطح کشور را محدود کند. این مسئله به‌ویژه در مورد مناطق کمتر مطالعه‌شده، از جمله برخی استان‌های دارای سابقه رخداد‌های لرزه‌ای، اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا عوامل شکل‌دهنده آسیب‌پذیری می‌توانند در زمینه‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی، کالبدی و محیطی تفاوت قابل توجهی داشته باشند.

از نظر مقیاس جغرافیایی نیز، نتایج نشان داد که بخش عمده مطالعات داخلی در مقیاس شهری انجام شده‌اند و استفاده از مقیاس‌های ریزتر مانند محله، بلوک شهری یا واحدهای مکانی کوچک‌تر محدود بوده است. در ادبیات بین‌المللی نیز تأکید شده است که حرکت از واحدهای اداری به سمت واحدهای فضایی ریزدانه‌تر می‌تواند دقت ارزیابی آسیب‌پذیری را افزایش دهد؛ زیرا بسیاری از فرآیندهای تولیدکننده آسیب‌پذیری در مقیاس‌های محلی شکل می‌گیرند (Contreras, Chamorro & Wilkinson, 2020). این تغییر رویکرد ناشی از آن است که واحدهای اداری بزرگ ممکن است تفاوت‌های مهم میان محلات مختلف از نظر کیفیت ساختمان، شرایط اجتماعی، دسترسی به خدمات و ظرفیت مقابله را پنهان کنند. در مقابل، بسیاری از مطالعات داخلی همچنان بر واحدهای آماری و اداری متداول متکی هستند که ممکن است توانایی محدودی در آشکارسازی الگوهای فضایی آسیب‌پذیری داشته باشند.

از منظر محتوایی، نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از مطالعات داخلی بر شاخص‌های کالبدی و فیزیکی، به‌ویژه ویژگی‌های ساختمان، مصالح ساختمانی و تراکم جمعیت تمرکز داشته‌اند. در این پژوهش، بیشترین میزان تکرار شاخص‌ها مربوط به نوع مصالح ساختمانی (۱۲۵ بار) و تراکم جمعیت (۱۱۵ بار) بوده است. اهمیت این شاخص‌ها با یافته‌های مطالعات بین‌المللی نیز همخوانی دارد، زیرا ویژگی‌های ساختمان و تراکم جمعیت همچنان از مهم‌ترین عوامل مرتبط با پیامدهای احتمالی زلزله محسوب می‌شوند. با این حال، مقایسه با روندهای جدید بین‌المللی نشان می‌دهد که دامنه شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری در حال گسترش است. مطالعات جدید علاوه بر شاخص‌های متعارف، به سمت استفاده از متغیرهای فضایی و زمانی با جزئیات بیشتر مانند جمعیت شناور، قابلیت دسترسی به خدمات، ویژگی‌های خردمحیط شهری و کیفیت فضاهای عمومی حرکت کرده‌اند (Contreras et al., 2020). در مقابل، در مطالعات داخلی ابعاد اجتماعی و نهادی آسیب‌پذیری مانند سرمایه اجتماعی، ظرفیت نهادی، مشارکت اجتماعی، سطح آگاهی عمومی، آمادگی جامعه و رفتارهای جمعی در برابر مخاطرات کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تفاوت نشان می‌دهد که بخش مهمی از مطالعات داخلی همچنان بر ابعاد قابل‌اندازه‌گیری کالبدی و فیزیکی تمرکز دارند، در حالی که رویکردهای جدید بین‌المللی تلاش می‌کنند تعامل میان عوامل مختلف شکل‌دهنده آسیب‌پذیری را در نظر بگیرند.

یکی دیگر از تفاوت‌های مهم میان مطالعات داخلی و روندهای جدید بین‌المللی، مربوط به ماهیت داده‌های جمعیتی مورد استفاده است. بررسی مطالعات داخلی نشان داد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها همچنان بر داده‌های سرشماری به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات جمعیتی تکیه دارند. اگرچه داده‌های سرشماری یکی از منابع مهم شناخت ویژگی‌های جمعیتی و اجتماعی هستند، اما ماهیت ایستا، وابستگی به زمان انجام سرشماری و محدودیت در نمایش تغییرات زمانی و فضایی جمعیت می‌تواند بر دقت ارزیابی آسیب‌پذیری اثرگذار باشد. در مقابل، مطالعات بین‌المللی اخیر به تدریج از تمرکز صرف بر جمعیت ثابت سرشماری به سمت استفاده از داده‌های جمعیتی پویا، تغییرات زمانی مواجهه جمعیت، جمعیت شناور و تفاوت الگوی حضور جمعیت در ساعات مختلف روز و شب حرکت کرده‌اند (Contreras et al., 2020). این تغییر رویکرد اهمیت زیادی دارد، زیرا جمعیت ساکن در یک مکان الزاماً با جمعیتی که هنگام وقوع زلزله در معرض اثرات آن قرار دارد، یکسان نیست. این موضوع به‌ویژه در کلان‌شهرها، مراکز فعالیت اقتصادی، مناطق گردشگری و فضاهای دارای تغییرات شدید روزانه جمعیت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از نظر داده‌های فضایی نیز، نتایج نشان داد که استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور در مطالعات داخلی محدود بوده است. در حالی که در ادبیات بین‌المللی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش‌ازدور در ارزیابی فضایی آسیب‌پذیری طی سال‌های اخیر افزایش یافته است. این روند به دلیل قابلیت این داده‌ها در فراهم کردن اطلاعات به‌روز، پوشش فضایی گسترده و استخراج متغیرهای محیطی و کالبدی بدون محدودیت‌های موجود در داده‌های سنتی است (Ibid, 2020).

از نظر روش‌شناختی نیز، یافته‌های این پژوهش نشان داد که بیشتر مطالعات داخلی همچنان بر روش‌های کارشناسی برای وزن‌دهی شاخص‌ها، به‌ویژه روش‌هایی مانند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، تأکید دارند. اگرچه این روش‌ها در شرایط محدودیت داده و نبود اطلاعات تاریخی خسارت می‌توانند مفید باشند، اما وابستگی زیاد به قضاوت خبرگان ممکن است موجب افزایش عدم قطعیت در نتایج شود. در مقابل، در مطالعات بین‌المللی استفاده از روش‌های داده‌محور، مدل‌های آماری پیشرفته، یادگیری ماشین و روش‌های تحلیل فضایی رشد بیشتری داشته است.

علاوه بر این، یکی از چالش‌های مهم در ارزیابی آسیب‌پذیری، مسئله اعتبارسنجی شاخص‌های مورد استفاده است. اگرچه استفاده از شاخص‌های ترکیبی در سال‌های اخیر گسترش یافته است، اما بسیاری از مطالعات اعتبار شاخص‌های ساخته‌شده را به‌صورت نظام‌مند بررسی نکرده‌اند. همان‌گونه که فاطمی و همکاران (Fatemi, Ardalan, Aguirre, Mansouri & Mohammadfam, 2017) اشاره کرده‌اند، اعتبار یک شاخص آسیب‌پذیری دارای دو جنبه اصلی شامل اعتبار مفهومی و اعتبار روش‌شناختی است. اعتبار مفهومی به میزان انطباق شاخص‌ها با ابعاد نظری آسیب‌پذیری و اعتبار روش‌شناختی به فرآیند انتخاب، وزن‌دهی، ترکیب و ارزیابی شاخص‌ها مربوط می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که صرف تولید یک شاخص ترکیبی نمی‌تواند تضمین‌کننده اعتبار علمی نتایج باشد.

در زمینه استفاده از GIS نیز تفاوت مهمی میان مطالعات داخلی و بین‌المللی مشاهده شد. در بسیاری از مطالعات داخلی، GIS عمدتاً به‌عنوان ابزاری برای آماده‌سازی داده‌ها، ترکیب شاخص‌ها و نمایش نقشه‌های آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گرفته است، در حالی که در مطالعات بین‌المللی، GIS علاوه بر تولید نقشه، برای تحلیل خودهمبستگی فضایی، شناسایی خوشه‌ها، بررسی ناهمگنی مکانی و تحلیل ساختار فضایی آسیب‌پذیری نیز به کار گرفته شده است (Contreras et al., 2020). بنابراین، تفاوت اصلی نه در استفاده یا عدم استفاده از GIS، بلکه در سطح کاربرد آن است؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از مطالعات داخلی GIS بیشتر نقش توصیفی داشته، در حالی که در ادبیات بین‌المللی به سمت کاربردهای تحلیلی و مدل‌سازی فضایی حرکت کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد که مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در ایران طی دو دهه گذشته از نظر تعداد، تنوع روش‌ها و دامنه موضوعی توسعه قابل توجهی یافته‌اند؛ با این حال، این حوزه همچنان با چالش‌هایی در زمینه انسجام نظری، توسعه روش‌شناختی، کیفیت داده‌ها و پیوند میان دانش علمی و کاربردهای مدیریتی مواجه است. یافته‌های پژوهش نشان داد که بخش مهمی از مطالعات داخلی بر رویکردهای شاخص‌محور، تولید شاخص‌های ترکیبی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری تمرکز

داشته‌اند، اما در بسیاری از موارد ارتباط میان انتخاب شاخص‌ها و چارچوب‌های نظری مشخص آسیب‌پذیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، توسعه چارچوب‌های مفهومی منسجم که بتواند ابعاد مختلف کالبدی، اجتماعی، اقتصادی، محیطی و نهادی آسیب‌پذیری را در یک ساختار تحلیلی هماهنگ ترکیب کند، از الزامات اصلی توسعه این حوزه در ایران است.

از نظر فضایی، نتایج نشان داد که توزیع مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری زلزله در کشور متوازن نبوده و تمرکز پژوهش‌ها در تعداد محدودی از مناطق، به‌ویژه مراکز دارای ظرفیت علمی و دسترسی بیشتر به داده‌ها، مشاهده می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد که پراکنش مطالعات علمی همواره منطبق بر الگوی فضایی خطرپذیری و نیازهای واقعی مناطق نبوده است. در نتیجه، توجه بیشتر به مناطق کمتر مطالعه‌شده، به‌ویژه مناطق روستایی، نواحی پیرامونی شهرها و استان‌های دارای سابقه رخداد‌های لرزه‌ای، می‌تواند به شناخت جامع‌تر الگوهای فضایی آسیب‌پذیری در سطح کشور کمک کند.

یکی دیگر از یافته‌های مهم این پژوهش، ضرورت توجه بیشتر به مقیاس تحلیل و کیفیت داده‌های مورد استفاده است. اگرچه بسیاری از مطالعات داخلی در مقیاس شهری انجام شده‌اند، اما پیچیدگی فرآیندهای شکل‌دهنده آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که تحلیل در مقیاس‌های محلی‌تر و استفاده از واحدهای فضایی ریزدانه می‌تواند شناخت دقیق‌تری از تفاوت‌های درونی مناطق فراهم کند. همچنین، حرکت از داده‌های جمعیتی ایستا به سمت داده‌های پویا و فضایی-زمانی، استفاده گسترده‌تر از داده‌های سنجش‌ازدور، داده‌های جمعیتی گریذبندی‌شده¹ و منابع اطلاعاتی نوین می‌تواند محدودیت‌های ناشی از اتکا به داده‌های سنتی سرشماری را کاهش دهد.

از نظر روش‌شناختی، یافته‌ها نشان داد که توسعه مطالعات آینده نیازمند افزایش استفاده از روش‌های داده‌محور، مدل‌های آماری پیشرفته، یادگیری ماشین و تحلیل‌های فضایی است. همچنین، توجه نظام‌مند به اعتبارسنجی شاخص‌ها، تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت باید به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری مورد توجه قرار گیرد. تولید شاخص‌های آسیب‌پذیری بدون بررسی اعتبار مفهومی و روش‌شناختی آن‌ها می‌تواند موجب کاهش قابلیت اعتماد نتایج و محدود شدن کاربرد آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی شود.

در نهایت، حرکت آینده مطالعات آسیب‌پذیری زلزله در ایران نیازمند گذار از رویکردهای صرفاً توصیفی و تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری به سمت توسعه سامانه‌های تحلیلی و تصمیم‌یار است. ترکیب چارچوب‌های نظری منسجم، داده‌های فضایی و زمانی دقیق‌تر، روش‌های تحلیل فضایی پیشرفته و سازوکارهای اعتبارسنجی می‌تواند امکان شناسایی دقیق‌تر عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری و طراحی مداخلات هدفمند برای کاهش ریسک زلزله را فراهم سازد. چنین رویکردی می‌تواند نقش ارزیابی آسیب‌پذیری را از یک ابزار صرفاً پژوهشی به یک مؤلفه مؤثر در برنامه‌ریزی فضایی، مدیریت بحران و افزایش تاب‌آوری جوامع در برابر زلزله ارتقا دهد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

سه‌م نویسندگان برابر است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حامی مالی ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از همه افراد، به دلیل مشاوره و راهنمایی علمی و مشارکت‌شان در این مقاله تشکر و قدردانی می‌نمایند.

References

- Alipour, F., Khankeh, H., Fekrazad, H., Kamali, M., Rafiey, H., & Ahmadi, S. (2015). Social issues and post-disaster recovery: A qualitative study in an Iranian context. *International Social Work*, 58(5), 689–703. <https://doi.org/10.1177/0020872815584426>
- Amini Hosseini, K., & Ghayamghamian, M. R. (2012). A survey of challenges in reducing the impact of geological hazards associated with earthquakes in Iran. *Natural Hazards*, 62(3), 901–926. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0123-7>
- Amiri, H., Rezapour, M., Nakhaee, N., Nekoei-Moghadam, M., Jahani, Y., & Moslehi, S. (2022). Suicide attempts in residents of Bam: 17 years after the Bam earthquake in Iran. *Minerva Psychiatry*, 63(1), 61–67. <https://doi.org/10.23736/S2724-6612.21.02173-4>
- Anugwa, I. Q., Obossou, E. A. R., Onyeneke, R. U., & Chah, J. M. (2023). Gender perspectives in vulnerability of Nigeria's agriculture to climate change impacts: a systematic review. *GeoJournal*, 88(1), 1139–1155. <https://doi.org/10.1007/s10708-022-10638-z>
- Armaş, I., Toma-Danila, D., Ionescu, R., & Gavriş, A. (2017). Vulnerability to earthquake hazard: Bucharest case study, Romania. *International journal of Disaster Risk Science*, 8(2), 182–195. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0132-y>
- Aubrecht, C., Freire, S., Neuhold, C., Curtis, A., & Steinnocher, K. (2012). Introducing a temporal component in spatial vulnerability analysis. *Disaster Advances*, 5(2), 48–53. https://www.researchgate.net/publication/231179667_Introducing_a_temporal_component_in_spatial_vulnerability_analysis
- Azmi, A. (2023). Strengths, weaknesses, opportunities and threats of sustainable urban development in Kermanshah. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 11(4), 224–23. https://doi.org/10.14246/irspsd.11.4_224
- Berberian, M. (2014). *Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian Plateau: A historical, social and physical approach* (Developments in Earth Surface Processes, Vol. 17). Amsterdam: Elsevier.
- Birkmann, J. (2006). Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and Measuring vulnerability to natural hazards: Towards Disaster Resilient Societies, 9.
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., ... & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), 193–211. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>
- Bruno Soares, M., Gagnon, A. S., & Doherty, R. M. (2012). Conceptual elements of climate change vulnerability assessments: A review. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 4(1), 6–35. <https://doi.org/10.1108/17568691211200191>
- Caldwell, P. H., & Bennett, T. (2020). Easy guide to conducting a systematic review. *Journal of Paediatrics and Child Health*, 56(6), 853–856. <https://doi.org/10.1111/jpc.14853>
- Contreras, D., Chamorro, A., & Wilkinson, S. (2020). The spatial dimension in the assessment of urban socio-economic vulnerability related to geohazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1663–1687. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1663-2020>
- Crane, T. A., Delaney, A., Tamás, P. A., Chesterman, S., & Ericksen, P. (2017). A systematic review of local vulnerability to climate change in developing country agriculture. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(4), e464. <https://doi.org/10.1002/wcc.464>
- Cutter, S. L., & Finch, C. (2008). Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(7), 2301–2306. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710375105>
- Eshghi, S., & Ahari, M. N. (2005). Performance of transportation systems in the 2003 Bam, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(S1), 455–468. <https://doi.org/10.1193/1.2098891>
- Fallahi, A. (2013). Technical report—Sheltering, from relief to reconstruction: One year after the 2010 East Azerbaijan Province earthquake. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 7(3), 122–135. <https://www.archnet.org/publications/7283>

- Farahani, S., Behnam, B., & Tahershamsi, A. (2020). Macrozonation of seismic transient and permanent ground deformation of Iran. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(11), 2889–2903. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2889-2020>
- Farahmand, G., Samet, K., Golmohammadi, H., & Patel, N. (2022). Vulnerability zoning of urban areas against earthquake (case study: Urmia city). *Geodesy and Cartography*, 48(3), 160–169. <https://doi.org/10.3846/gac.2022.14788>
- Fatemi, F., Ardalan, A., Aguirre, B., Mansouri, N., & Mohammadfam, I. (2017). Social vulnerability indicators in disasters: Findings from a systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.09.006>
- Foong, L. K., Jamali, A., & Lyu, Z. (2020). Ground surface changes detection using interferometric synthetic aperture radar. *Smart Structures and Systems*, 26(3), 277–290. <https://doi.org/10.12989/sss.2020.26.3.277>
- Ford, J. D., Pearce, T., McDowell, G., Berrang-Ford, L., Sayles, J. S., & Belfer, E. (2018). Vulnerability and its discontents: the past, present, and future of climate change vulnerability research. *Climatic Change*, 151(2), 189–203. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2304-1>
- Gerçek, D., & Güven, İ. T. (2023). Urban earthquake vulnerability assessment and mapping at the microscale based on the catastrophe progression method. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(5), 768–781. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00512-y>
- Ghafory-Ashtiany, M. (2014). Earthquake risk and risk reduction capacity building in Iran. *Extreme natural hazards, disaster risks and societal implications*. Cambridge University Press, Cambridge, 267–278. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139523905.026>
- Habibi, S., Basirat, M., & Razavi, M. H. (2020). Towards national urban policy in IR of Iran. In *Developing National Urban Policies: Ways Forward to Green and Smart Cities* (pp. 231–254). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3738-7_9
- Jena, R., & Pradhan, B. (2019). Earthquake vulnerability assessment using expert-based approach in GIS. In *2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)* (pp. 53–56). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IconSpace.2019.8905929>
- Jena, R., Pradhan, B., & Beydoun, G. (2020). Earthquake vulnerability assessment in Northern Sumatra province by using a multi-criteria decision-making model. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 46, 101518. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101518>
- Kalantari, M., & Vostanis, P. (2010). Behavioural and emotional problems in Iranian children four years after parental death in an earthquake. *International Journal of Social Psychiatry*, 56(2), 158–167. <https://doi.org/10.1177/0020764008101854>
- Kuhlicke, C., de Brito, M. M., Bartkowski, B., Botzen, W., Doğulu, C., Han, S., et al. (2023). Spinning in circles? A systematic review on the role of theory in social vulnerability, resilience and adaptation research. *Global Environmental Change*, 80, 102672. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102672>
- Matasci, C. (2012). *Swiss tourism in the age of climate change: vulnerability, adaptive capacity, and barriers to adaptation* (Doctoral dissertation, EPFL). <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-5506>
- Moghabeli, R., Bahadori, F., & Mohammadi, A. R. (2025). Spatio-Temporal Analysis of Earthquake Occurrences in Iran (1996–2024): A Vulnerability Assessment with a Focus on Urban Areas. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 166–189. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.92804.1562>
- Nikpayam, R. (2013). Reducing the unforeseen incidents damages (earthquake) by using round poles and reducing the pole mounted distribution transformers power. In *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)* (pp. 1–4). IET. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0949>
- Ommi, S., & Amini, H. (2024). Priority of developing public open spaces based on seismic resilience assessment for Tehran, Iran. *Acta Geophysica*, 72(5), 3007–3020. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01269-0>
- Perestelo-Pérez, L. (2013). Standards on how to develop and report systematic reviews in Psychology and Health. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 13(1), 49–57. [https://doi.org/10.1016/S1697-2600\(13\)70007-3](https://doi.org/10.1016/S1697-2600(13)70007-3)

- Pilehvar, A. A. (2021). Spatial-geographical analysis of urbanization in Iran. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00741-w>
- Rajabi, F., Hosseinali, F., & Rabiei-Dastjerdi, H. (2024). An examination and analysis of the clustering of healthcare centers and their spatial accessibility in Tehran metropolis: Insights from Google POI data. *Sustainable Cities and Society*, 117, 105845. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105845>
- Ramli, M. W. A., & Alias, N. E. (2024). Multidimensional vulnerability mapping using GIS and catastrophe theory. *International Journal of Geoinformatics*, 20(8), 1–16. <https://doi.org/10.52939/ijg.v20i8.3443>
- Rashed, T., & Weeks, J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(6), 547–576. <https://doi.org/10.1080/1365881031000114071>
- Shahpari, G., Sadeghi, H., Ashena, M., & Shahpari, M. (2021). Economic effects of earthquakes: Focusing on the health sector. *International Journal of Economic Policy in Emerging Economies*, 14(1), 85–100. <https://doi.org/10.1504/IJEPEE.2021.111935>
- Talebian, M., Copley, A. C., Fattahi, M., Ghorashi, M., Jackson, J. A., Nazari, H., Walker, R. T., et al. (2016). Active faulting within a megacity: The geometry and slip rate of the Pardisan thrust in central Tehran, Iran. *Geophysical Journal International*, 207(3), 1688–1699. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw347>
- Tate, E. (2012). Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. *Natural hazards*, 63(2), 325–347. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0152-2>
- Tonmoy, F. (2013). Assessment of vulnerability to climate change: theoretical and methodological developments with applications to infrastructure and built environment. Civil Engineering, University of Sydney. PhD Thesis. Access link: <http://hdl.handle.net/2123/10167>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *Earthquake Hazards Program*. <https://earthquake.usgs.gov/>
- Wolf, S., Hinkel, J., Hallier, M., Bisaro, A., Lincke, D., Ionescu, C., & Klein, R. J. T. (2013). Clarifying vulnerability definitions and assessments using formalisation. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(1), 54–70. <https://doi.org/10.1108/17568691311299363>