Disaster Prevention and Management Knowledge

Summer 2026. Vol 16. Issue 2

Research Paper

Multicriteria Assessment of Seismic Resilience Indicators in Urban Apartment Housing in Mashhad, Iran: An Examination of Ten Case Studies

Ehsan Biglari[1], ***Ali Biglari**[2]

1. Department of Architecture, Ma. C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Natural Hazard Management Research Center, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation Biglari, E., & Biglari, A. (2026). [Multicriteria Assessment of Seismic Resilience Indicators in Urban Apartment Housing in Mashhad, Iran: An Examination of Ten Case Studies (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, *16*(2):214-263. https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.965.1

https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.965.1

ABSTRACT

Background and objective To enhance seismic resilience, accurately and comprehensively identifying the components affecting vulnerability, along with the quantitative and integrated determination of the influence of each variable, is one of the most fundamental and strategic approaches. The present study aimed to assess the level of seismic resilience by applying multicriteria analysis methods across physical, infrastructural, economic, social, and managerial dimensions. This comprehensive approach helps identify strengths and weaknesses in each domain and provides a basis for developing effective intervention programs to improve resilience to earthquakes.

Methods This study adopted a systematic approach. First, the indicators influencing resilience were extracted through a comprehensive review of the relevant literature, and the variables affecting each indicator were identified. Subsequently, the principal and key factors were determined using principal component analysis (PCA) and data-processing procedures. Next, the resilience status of ten residential apartment buildings in different areas of Mashhad City, Iran, was evaluated through a multicriteria assessment using the Analytic Hierarchy Process. Finally, an integrated seismic resilience index was calculated by summing the weighted values of the standardized indicators, thereby providing a comprehensive measure for assessing the overall resilience of the buildings. This index enables the comparison and ranking of buildings based on their level of resilience to earthquakes.

Results The PCA demonstrated significant correlations between the investigated variables and seismic resilience. Among the principal components, the physical component had the greatest effect on seismic resilience. Furthermore, considering the relationships between the parameters and resilience indicators, housing quality, with a factor loading of 0.996, played the most significant role in ensuring the seismic resilience of residential apartments in Mashhad City.

Conclusion By presenting a comprehensive framework for measuring resilience, this study not only identifies existing vulnerabilities but also provides an essential prerequisite for designing and implementing targeted and effective preventive measures. By considering the identified spatial patterns of vulnerability, such measures can, as part of a resilience-oriented approach, effectively reduce earthquake-related losses. Nevertheless, fully realizing the objectives of this study requires replication in other regions of the country and at the national level. Such efforts would provide a comprehensive understanding of seismic resilience at the macro scale and facilitate more precise planning based on the results.

Keywords Built environment, Seismic resilience, Residential land use, Multicriteria assessment, Analytic hierarchy process

Article Info:

Received: 24 Jun 2025

Accepted: 13 Oct 2025

Available Online: 01 Apr 2026

Corresponding Author:
Ali Biglar, Associate Professor.
Address: Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran.
Tel: +98 (915) 5056615
E-mail: a.biglari@gu.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Mashhad metropolis, as the second most populous metropolitan area in Iran, is located in a region characterized by moderate-to-high seismic hazard. Active faults surrounding the city make the occurrence of a destructive earthquake a serious and persistent threat (Maroufi et al., 2022). Moreover, a substantial proportion of the city's residential fabric consists of mid-rise and high-rise apartment buildings, which accommodate millions of residents. The traditional approach to earthquake engineering, focused solely on preventing building collapse and protecting human life, is insufficient for a city of this scale. Even when buildings do not collapse, structural and nonstructural damage may prolong disruption of habitation, impose substantial reconstruction costs, and paralyze the city's social and economic functions (Walker et al., 2014). Therefore, the transition from seismic resistance to seismic resilience has become an unavoidable necessity in managing the risk faced by this metropolis.

According to (Brune et al., 2003) definition, seismic resilience refers to the ability of a system to reduce the likelihood of collapse, absorb the impacts of a seismic event, and rapidly and efficiently recover to an acceptable level of performance (Brune et al., 2003). This capacity is founded on four principal pillars: enhancing strength and performance, providing redundancy and alternative components, mobilizing resources, and ensuring rapid recovery (Cutter et al., 2003).

To measure the various dimensions of resilience, a set of quantitative and qualitative criteria is defined, collectively referred to as resilience indicators. In general, seismic resilience indicators are classified into five dimensions: physical–structural, infrastructural–urban, economic, social, and managerial–institutional (Sinha et al., 2016).

Previous studies in the field of seismic resilience have primarily focused on structural indicators or macro-level urban indicators (Dodanwala et al., 2024), while overlooking the critical role of criteria such as social capital, residents' preparedness, the effectiveness of crisis management, and access to emergency services (Chee Yin, et al., 2022). Accordingly, the lack of an integrated, multicriteria framework for assessing resilience at the scale of conventional residential buildings, with the simultaneous consideration of all nonstructural dimensions, remains a significant research need (Kim et al., 2024; Anwar, 2020).

In addition to identifying, weighting, and prioritizing the indicators influencing resilience across the five aforementioned dimensions in order to provide a comprehensive and realistic representation of the seismic resilience of residential apartment buildings, the present study seeks to contextualize this concept within the geographical setting of Mashhad City, taking into account its specific sociocultural conditions. Furthermore, the use of multicriteria assessment methods as a practical decision-making tool for ranking buildings by resilience—providing planners and policymakers with objective and quantitative outputs—constitutes another major innovation and original contribution of this research.

This study ranks the seismic resilience of residential apartment buildings in Mashhad City using a comprehensive multicriteria framework. Given the growing importance of urban resilience to earthquakes, this study seeks to provide an accurate picture of the existing situation and identify the factors influencing it. To achieve this objective, three fundamental questions are addressed. First, what are the key criteria and indicators influencing the seismic resilience of residential apartment buildings in Mashhad City? Second, what are the relative weights and importance of these criteria and indicators, and to what extent does each contribute to overall resilience? Third, what is the current resilience status of the sampled apartment buildings based on the identified resilience indicators, and what strengths, weaknesses, and improvement strategies can be identified?

Accordingly, the research hypotheses are as follows. First, the seismic resilience of residential apartment buildings in Mashhad City is not limited solely to structural safety but is also influenced by multiple other factors, including social, economic, and environmental factors. Second, a significant relationship exists between building resilience and variables such as the number of floors, urban district, residential unit floor area, household size, and distance from emergency and crisis-management centers. Examining these relationships can improve understanding of resilience and support the development of more appropriate strategies.

The findings of this study will provide crisis-management authorities with an effective tool for identifying and prioritizing vulnerable neighborhoods and buildings, thereby facilitating the optimal allocation of seismic-retrofitting budgets. These findings may contribute to the development of a strategic urban-planning document and, by incorporating resilience criteria into construction regulations and detailed urban plans, provide a foundation for safer urban development. They may also facilitate the

prediction of potential losses, the response time required, and the resources needed for post-earthquake reconstruction—factors vital for relief and emergency-response organizations. In addition, the results may serve as a basis for designing and implementing educational campaigns aimed at increasing public awareness and enhancing citizens' preparedness for earthquakes.

This study encountered several limitations, including the difficulty of quantifying certain qualitative indicators, such as social capital and neighborhood cohesion, which require indirect measurement approaches; the dependence of the data on the accuracy and transparency of respondents' answers; and the need for interdisciplinary expertise to conduct a comprehensive analysis of the data.

Following this introduction, the next section reviews the theoretical foundations and previous research. Subsequently, the research methodology and the procedures used for data collection and multicriteria analysis are described. The Findings section presents and analyzes the results, followed by the Discussion and Conclusions.

Table 1. Previous studies on seismic resilience (developed by the authors)

General Area	Researcher(s)	Year	Research Topic	Method/Model	Key Findings	Research Gaps and Limitations	Overall Conclusions	Source
Conceptual review	Sharifi	2016	A review of the principles and indicators of urban resilience	Systematic literature review and content analysis	Resilience indicators can be classified into four categories: social, economic, institutional, and physical.	This study is a literature review and does not itself provide an operational assessment method.	A comprehensive and well-documented classification of key resilience indicators was developed for use in subsequent studies.	Sharifi et al. (2016)
	Aslani	2018	A review of the concepts, indicators, frameworks, and models of earthquake resilience	Review of specialized literature and written documents related to the subject	Resilience is inherently characterized by a social dimension.	Unidimensional perspectives are no longer adequate in this field.	The adoption of an integrated approach is indispensable for research in this area.	Aslani et al. (2018)
Concept development	Kamilari	2010	Development of a conceptual framework for assessing the seismic resilience of urban systems	PEOPLES model—a framework based on seven functional dimensions	Resilience is a multidimensional concept and cannot be measured using a single engineering indicator.	The model is conceptual and requires developing quantitative methods to operationalize each dimension. In addition, sufficient data for operationalizing the model are not always available.	A comprehensive framework was developed for defining and measuring resilience at the community level.	Kamilari et al. (2010)
	Bruneau	2003	Development of the concept of seismic resilience in communities	Theoretical study and development of the R=f(TCRE) R=f(TCRE) R=f(TCRE) framework, based on fragility and recovery speed	Resilience can be enhanced by reducing risk levels, particularly fragility, and shortening the post-earthquake recovery period.	The framework is qualitative and lacks quantitative methods for calculating numerical indicators.	The study established the modern concept of seismic resilience and introduced it as a systemic characteristic.	Bruneau et al. (2003)
	Bocchini	2014	An analytical framework for post-earthquake community recovery and resilience planning	Multiobjective optimization and agent-based modeling	An integrated model was developed to optimize the allocation of limited resources during the post-disaster recovery process.	The model is highly complex, and its implementation at the citywide scale requires extensive data and considerable computational power.	The study linked structural engineering, urban planning, and economics to maximize recovery efficiency.	Bocchini et al. (2014)

General Area	Researcher(s)	Year	Research Topic	Method/Model	Key Findings	Research Gaps and Limitations	Overall Conclusions	Source
Assessment methods	Pitilakis	2014	Assessment of the seismic resilience of urban infrastructure networks	Fuzzy multicriteria AHP method	Combining AHP with fuzzy logic provides a powerful tool for managing uncertainty in the assessment of qualitative resilience indicators.	The study focused exclusively on infrastructure and did not consider buildings separately.	A systematic method was developed for prioritizing resilience indicators while accounting for ambiguity and uncertainty.	Pitilakis et al. (2014)
	Rauf	2015	Development of quantitative indicators for measuring community resilience (BRIC)	Development of a composite index weighted according to expert opinions	The proposed BRIC index can be used to compare the resilience of different communities to natural hazards.	The data required to calculate the index are often unavailable or incomplete at the urban-neighborhood level.	A single numerical index was developed to rank and monitor resilience.	Rauf et al. (2015)
	Burton	2015	Development of a framework for assessing building resilience	Performance-based simulation modeling using FEMA P-58 and recovery-time estimation	A quantitative method was developed for calculating the time required for a building to return to an acceptable performance level after an earthquake.	The method requires highly detailed, building-specific data, and its computations are complex and time-consuming.	The study enabled the quantitative comparison of the resilience of different buildings based on the criterion of recovery time.	Burton et al. (2015)
Case study	Aslani	2019	Assessment of the physical resilience of Karaj to earthquakes	Questionnaire survey and AHP for weighting and prioritizing indicators	The most important resilience component was infrastructure, followed by buildings. The components of urban fabric and structure, land uses, and natural factors ranked lower.	Data were unavailable for approximately 10% of the indicators, including "the sustainability of livelihoods and businesses after an earthquake" and "the adaptability and flexibility of land uses."	Vulnerable areas of Karaj were identified and analyzed; indicators were extracted based on a conceptual framework, and their priorities and weights were determined.	Aslani et al. (2019
	De Risi	2018	Assessment of the seismic resilience of high-rise reinforced-concrete buildings	Monte Carlo simulation and uncertainty analysis	Uncertainty in earthquake-related parameters has a substantially greater effect on the variability of resilience results than uncertainty in building modeling.	The study focused on a specific building type; therefore, generalization of the findings requires the examination of other structural systems.	The study highlighted the necessity of incorporating the inherent uncertainty of earthquake hazards into any realistic resilience assessment.	De Risi et al. (2018)

Literature review

Theoretical foundations

In recent decades, the approach to natural-disaster risk management has shifted from an exclusive focus on vulnerability reduction toward resilience enhancement (Adger et al., 2005). As a holistic paradigm, resilience emphasizes not only the resistance of structures to earthquake forces but also the ability of a system to absorb shocks, adapt to changing conditions, and rapidly return to an acceptable level of functionality (Proag, 2014). Although resilience has been defined in various ways across scientific disciplines, the common core of these definitions lies in the capacity of a system to cope with disruptions, maintain its primary functions, and recover rapidly and effectively (Alberti, 2005).

Accordingly, seismic resilience may be more specifically defined as the capacity of a community's social, economic, physical, and managerial systems to anticipate, withstand, and reduce the impacts of an earthquake, as well as their ability to recover, reconstruct, and return to normal conditions—or even improve upon pre-event conditions—as quickly as possible, with the lowest possible costs and social consequences (Kärrholm et al., 2014).

Studies have demonstrated that resilience is a multidimensional phenomenon. One of the most influential theoretical frameworks emphasizing the various dimensions of resilience is the Brune model. This framework, which guides the methodology of the present study, identifies the following principal dimensions (Brune et al., 2003):

- Technical resilience: This refers to the ability of physical systems and infrastructure to withstand an earthquake and maintain their functionality (Boon et al., 2012). Its indicators include the quality of construction materials, compliance with building codes, structural ductility, and related factors.

- Economic resilience: This concerns the capacity of a community's economic system to absorb earthquake-related losses and rapidly return to normal economic activities (Michel et al., 2014). Relevant indicators include access to insurance coverage and the occupational and income diversity of residents.

- Social resilience: This refers to social capital, place attachment, public awareness, and the capacity of local communities to cooperate and provide mutual assistance during periods of crisis and reconstruction (Adger, 2000). This dimension assesses indicators, such as social cohesion, educational attainment, and awareness of earthquake risks.

- Organizational resilience: This dimension addresses the capacity of responsible organizations and institutions to plan, coordinate, and effectively manage emergency response under crisis conditions (Klein et al., 2003). Indicators such as the speed of emergency assistance and the availability of evacuation and temporary-shelter plans fall within this category.

Taken together, these dimensions constitute a general framework for comprehensively assessing resilience. However, given the broad scope of the physical dimension, and depending on the objectives of the study, it may be examined in two separate domains: the physical domain, which is associated with buildings, and the infrastructural domain, which is related to urban utilities and facilities.

The precise identification of the dimensions and domains directly and indirectly affected by earthquake hazards makes it possible to define and measure quantitative and qualitative indicators to assess the degree of vulnerability in each domain. These indicators can evaluate various forms of vulnerability, including the physical vulnerability of buildings, the vulnerability of critical infrastructure, and economic and social vulnerability. The integrated and systematic analysis of these indicators, together with the determination of the relative weight and importance of each indicator based on local conditions and demographic characteristics, operationalizes the process of identifying the key factors contributing to enhanced seismic resilience.

By providing a comprehensive perspective on the key factors influencing resilience, this integrated approach facilitates the development and implementation of effective and targeted programs to reduce vulnerability and enhance earthquake preparedness. Ultimately, it can contribute to reducing the human and financial losses caused by this natural hazard. Figure 1 illustrates the conceptual model of this comprehensive and integrated process, presenting the relationships among the various indicators and their effects on resilience.

Review of previous research

Early studies focused primarily on physical resilience and the assessment of structural vulnerability. Gradually, with the development of frameworks such as the Brune model (Brune et al., 2003) and Cutter's community resilience model (Cutter et al., 2003), research shifted toward a more comprehensive perspective and the quantification of various dimensions of resilience. Applying multicriteria decision analysis to assess and weight different indicators can provide an operational approach for identifying and better understanding of resilience.

In Iran, although numerous studies have examined the seismic vulnerability of cities and deteriorated urban areas, the concept of resilience—particularly from a multidimensional perspective—remains relatively new. Most existing studies have focused on a specific dimension, primarily physical characteristics. Moreover, despite the fact that residential land use accounts for approximately 50% of the total urban land-use area on average and represents the most important and sensitive domain in any city, many studies conducted at the metropolitan scale have failed to consider the specific characteristics of different types of residential fabrics—including historic and newly developed areas, as well as apartment-based and detached housing—their physical conditions, and the eco-

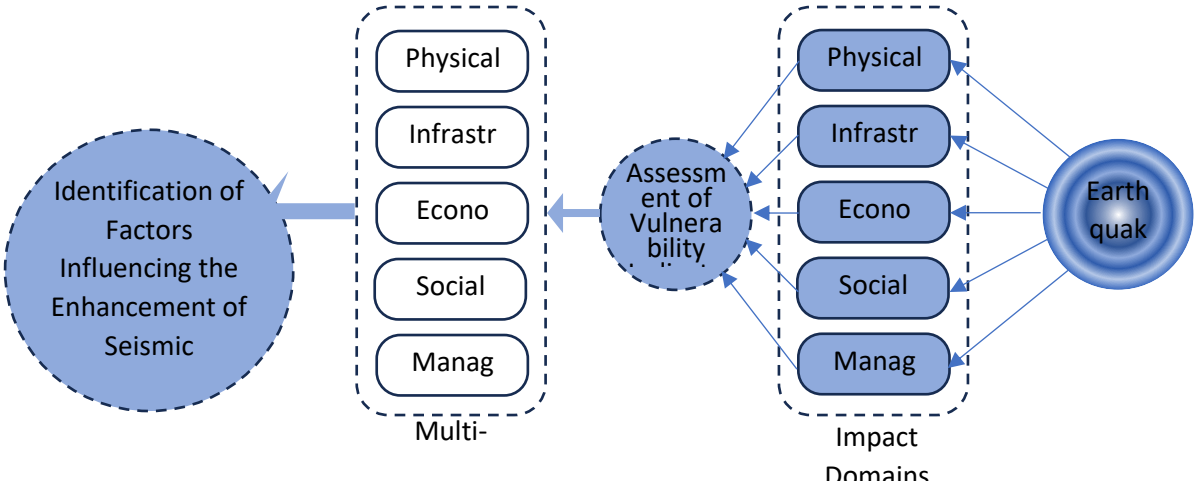


Figure 1. Conceptual model of the research (developed by the authors)

nomic, social, and other circumstances governing them (Amanpour et al., 2016). Table 1 presents some of the most important studies conducted on the assessment of seismic resilience in residential buildings.

A review of the relevant literature reveals several research gaps that the present study seeks to address. First, there is a clear shortage of integrated models for assessing resilience at the micro scale, particularly at the building level. Most existing models operate at the metropolitan or regional scale and do not facilitate the assessment and comparison of individual residential units. Second, comprehensive studies that simultaneously address the various dimensions of resilience in apartment-based residential environments, particularly within Iran's urban context, remain limited. These dimensions have generally been examined separately rather than through an integrated framework. Third, the lack of comparative studies across different residential fabrics within a single city has hindered an understanding of the differences, strengths, and weaknesses of each fabric in confronting earthquake hazards. For example, no systematic assessment based on a consistent methodology has yet compared the seismic resilience of buildings in historic neighborhoods with that of buildings in intermediate and newly developed urban areas within a city, such as Mashhad. Fourth, contextualizing and weighing resilience indicators is crucial, since many indicators incorporated into global models are not fully compatible with Iran's cultural, social, and economic conditions. Therefore, identifying and weighting localized indicators that accurately reflect the realities of Iranian society constitutes a fundamental research need and gap that the present study seeks to address.

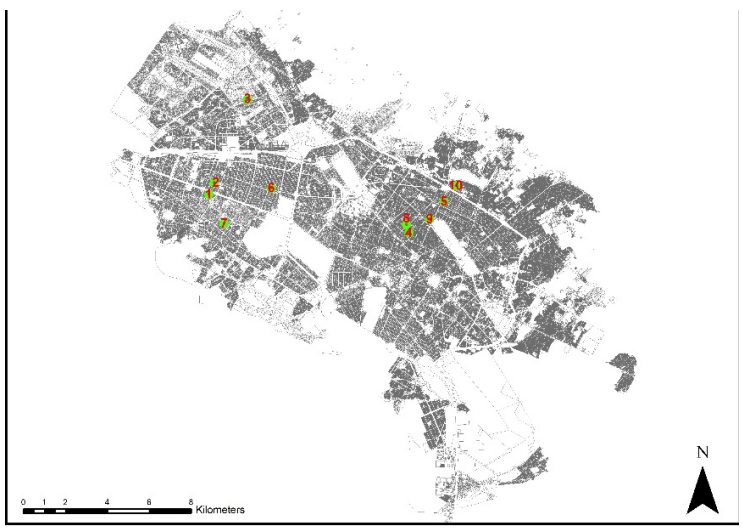


Figure 2. Location of the sample buildings in Mashhad, Iran (authors' compilation)

Table 2. Characteristics of the neighborhoods containing the sample buildings (data extracted from the atlas of Mashhad neighborhoods (Peyravi et al., 2020)

Sample	Neighborhood	Urban District	Area (ha)	Share of Total City Area (%)	Green-Space Coverage (%)	Green-Space Per Capita	Population	Share of Total City Population (%)	Population Density (Persons/ha)	Male-to-Female ratio	Average Household Size	Literacy Rate (%)	Predominant Age Group
1	Haft-e Tir	9	231.19	0.67	2.16	1.03	31,021	1.01	134.18	95.68	2.96	97.61	25–39
2	Farhang	11	206.77	0.60	3.34	1.52	33,048	1.08	159.83	95.13	3.14	97.63	25–39
3	Ghasemabad	10	249.48	0.73	7.20	3.77	42,392	1.38	169.92	100.44	3.25	97.25	20–34
4	Amel	2	55.64	0.16	0.00	0.00	10,303	0.34	185.16	96.70	3.05	91.77	30–34
5	Gaz	2	70.31	0.20	0.00	0.00	15,187	0.50	216.00	97.85	3.16	91.58	25–34
6	Emamat	11	182.28	0.53	0.65	0.25	28,777	0.94	157.87	97.52	3.12	96.97	25–39
7	Hashemieh	9	106.67	0.31	1.678	0.81	16,126	0.53	151.18	97.33	3.07	98.02	25–39
8	Motahari	2	165.20	0.48	0.9907	0.38	42,510	0.14	257.33	100.00	3.15	92.06	30–34
9	Ebadi	2	51.73	0.15	8.14	2.47	13,013	0.004	251.58	101.88	3.01	92.58	25–34

Applying a multicriteria analysis approach to assess the seismic resilience of residential apartments in Mashhad City is an innovative and multifaceted necessity that extends beyond the limitations of traditional studies. Such studies have often focused exclusively on physical characteristics and have consequently failed to develop a comprehensive assessment of resilience dimensions within the context of building as dynamic social–physical systems. By incorporating diverse indicators from multiple resilience dimensions within the context of Mashhad City, the multicriteria approach enables a more comprehensive assessment. It also facilitates comparisons among the city's different residential fabrics. By assigning appropriate weights to the indicators, the resilience of buildings in each area can be measured separately and compared with that of other areas or building groups.

For example, a newly constructed building may exhibit favorable physical conditions but perform poorly in the social dimension because of weak social cohesion among its residents. This type of comparative analysis provides valuable information for urban planning and the optimal allocation of crisis-management resources. In addition, multicriteria methods, by determining the relative weight and importance of each indicator, help identify the most influential factors affecting resilience in each area. This enables urban managers to focus on strengthening key indicators in accordance with the specific characteristics of each area rather than implementing broad and costly programs. For instance, seismic resilience in one area may be improved by prioritizing social education and preparedness programs, whereas in another area, greater emphasis may be placed on structural renewal and seismic retrofitting.

Study area

Mashhad, the administrative center of Khorasan Razavi Province, with a population exceeding 3.5 million according to the 2026 census, is the second most populous metropolis in Iran. The city is situated on a plain between 59°15′ and 60°36′ East longitude and 35°43′ and 37°08′ North latitude, covering more than 400 square kilometers (Peyravi et al., 2020). The urban fabric of Mashhad City is highly heterogeneous, comprising a mosaic of deteriorated historical quarters, intermediate zones with moderate building density, and newly developed, high-density residential districts. This pronounced diversity in terms of residents' socioeconomic status, construction quality, and building age makes Mashhad City an ideal case study for assessing urban seismic resilience.

Moreover, Mashhad City is located in a high-seismicity zone and has historically experienced devastating earthquakes. The most prominent historical event was the 1673 earthquake (1084 AH), with an estimated magnitude of approximately 6.5, which caused widespread destruction across the city and resulted in thousands of fatalities (Moghadas et al., 2018). Other historical and instrumentally recorded seismic events in the surrounding areas further corroborate the active tectonic nature of this fault zone. The primary source of seismic hazard in the city

Table 3. Indicators and variables affecting seismic resilience

Dimension	Variables	Description	Source
Physical	Structural type	Type of structural system used in the building	Martinez et al. (2012)
	Structural quality	Building usability under crisis conditions	Sinha et al. (2016)
	Lateral-force-resisting system	Type of lateral-force-resisting system	Martinez et al. (2012)
	Building age	Time elapsed since the construction of the building	Sinha et al. (2016)
	Structural dimensions	Length, width, and height of the building	Armas et al. (2015)
	Structural separation distances	Distance from adjacent and facing buildings	Ovist et al. (2012)
Infrastructural	Percentage of residential land use	Proportion of residential land use relative to other land uses in the area surrounding the building	Carreño et al. (2007)
	Access to the transportation network and major roads	Distance from the building to major roads and the urban transportation network	El-Maissi et al. (2022)
	Quality of adjacent roads under hazardous conditions	Level of safety of roads adjacent to the building during emergencies	Kilanitis et al. (2019)
	Access to open and safe spaces	Distance from the building to the nearest open or safe space	Armas et al. (2015)
	Access to emergency-service facilities (healthcare, fire, and police)	Average distance from the building to the three main types of emergency-service facilities	Niazi et al. (2021)
	Distance from hazardous areas, sites, and land uses	Average distance from the building to sites or land uses with hazard potential	Armas et al. (2015)
	Access to urban utilities and services (water, electricity, gas, telephone, internet, etc.)	Availability of urban services under crisis conditions	Alami et al. (2024)
Economic	Employment and income status	Level of residents' economic capacity under crisis conditions	Soteli et al. (2017)
	Average housing price	Monetary value per unit area of housing, used as a measure of residents' financial capacity in the city	Tasman et al. (2023)
	Housing quantity	Floor area of the residential unit, used as a measure of residents' financial capacity in the area	Soteli et al. (2017)
	Housing quality	Capacity of housing to meet residents' needs	Sinha et al. (2016)
Social	Population density in the area	Average number of people per unit area	Rasheed et al. (2003)
	Total number of residents	Number of people residing in the building	Rasheed et al. (2003)
	Physical health status and mean age	Average age of residents, used as a measure of their physical capacity	Hong et al. (2024)
	Sex ratio	Female-to-male ratio among the building's residents	Soteli et al. (2017)
	Household size	Number of people residing in a residential unit	Hong et al. (2024)
	Literacy rate	Average educational level of residents	Soteli et al. (2017)
Managerial	Level of preparedness in the event of an earthquake	Extent to which crisis response has been anticipated by the urban-management organization	Walker et al. (2014)
	Availability of multipurpose and emergency centers	Presence of an emergency center within a radius of 5,000 m	Bruneau et al. (2007)
	Provision of essential facilities and equipment	Availability of urban equipment for use under crisis conditions	Bruneau et al. (2007)
	Availability of appropriate signs and wayfinding systems	Installation of urban signs to provide guidance during emergencies	Zhao et al. (2023)

is the Mashhad Fault (Shad et al., 2020), which trends northwest–southeast over a length of approximately 150 km, passing through the central and southern parts of the metropolis. Geological and seismotectonic investigations confirm that this fault is active and capable of generating an earthquake with an estimated magnitude of up to 7.0 (Hayati et al., 2015).

To account for this urban and spatial heterogeneity, case study buildings were selected through a purposive and clustered sampling scheme across neighborhoods with distinct urban characteristics. Consequently, samples were drawn from two broad categories: central deteriorated urban fabrics and intermediate/newly developed areas. The central districts are primarily characterized by fine-grained urban fabrics, narrow access passages, high population densities, deteriorated building stock, comparatively lower socioeconomic profiles, and a severe deficit of open and refuge spaces. These quarters represent areas with the highest intrinsic seismic vulnerability. Conversely, the intermediate and newly developed districts feature modern apartment complexes, wider road networks, superior access to public services and urban green spaces, and residents of middle-to-high socioeconomic status, representing semi-regular, planned fabrics with moderate-to-high levels of resilience.

The case studies were selected via a systematic, multicriteria procedure to facilitate an operational and empirical assessment of seismic resilience. This selection accounted for physical, infrastructural, economic, social, and managerial–institutional dimensions. The sampling strategy employed a hybrid approach combining stratified, cluster, and random sampling techniques. In the initial stage, the city was categorized into relatively homogeneous spatial zones based on the aforementioned dimensions, yielding two principal fabric typologies (deteriorated fabrics vs. intermediate/newly developed fabrics). Representative neighborhoods were then selected as sampling clusters from each typology. Finally, individual residential apartment buildings were randomly selected within each cluster for in-depth assessment. This hybrid sampling framework ensures adequate representation of the diverse urban typologies, thereby enhancing the internal validity and generalizability of the resilience assessment findings. Table 2 presents the general characteristics of the districts encompassing the selected case studies, and Figure 2 shows their spatial distribution across the city.

Materials and Methods

Indicators and variables

The multidimensional concept of resilience in the face of seismic hazards can be adequately described only by selecting an appropriate set of influential variables. Accordingly, this study considered five categories of indicators: physical, infrastructural, economic, social, and managerial characteristics. Statistical methods were then employed to identify the variables affecting integrated seismic resilience.

The first step in the methodological framework involved identifying and integrating the relevant data to establish a comprehensive assessment platform (Table 3). From the physical perspective, seismic resilience encompasses the structural characteristics of buildings. From the infrastructural perspective, it depends on the facilities and capacities available under hazardous conditions, including the spatial configuration and quality of transportation infrastructure, which determine accessibility to hospitals and emergency-management stations. In addition, the economic dimension of seismic resilience is associated with the capacity to cope with and recover from a crisis, as well as the value of assets potentially exposed to damage in the event of a hazard. From the social perspective, seismic resilience includes the total number and proportion of vulnerable populations exposed to risk. Finally, the managerial dimension depends on the capacity to provide emergency services, reduce damage, and prevent the escalation of hazardous conditions.

Data collection

The final variables comprised six physical, seven infrastructural, four economic, six social, and four managerial variables. Data for these variables were collected through field observation and investigation, consultation of municipal databases and official government documents, face-to-face interviews using a structured questionnaire, and an expert survey. Table 4 presents the data-collection method and source of information for each variable.

Physical variables

Physical data were collected at two levels: the building level and the surrounding-environment level. To obtain accurate, reliable building-level data, information related to the physical characteristics of the buildings was extracted by examining and analyzing official building completion certificates. This approach provided access to comprehensive information, including floor area, number of stories, and other technical specifications.

Conversely, variables associated with the environment surrounding each building were assessed and recorded through direct observation and field investigations. This method enabled the collection of information on inter-building distances and comprehensive conditions and characteristics of the buildings' surroundings. Accordingly, this dual approach produced a comprehensive, integrated dataset of physical characteristics at both the building and environmental levels, providing the basis for subsequent analyses and assessments.

Infrastructural variables

Data collection for the infrastructural variables relied on two primary sources: first, the information available in the comprehensive municipal database; and second, detailed observations and field investigations conducted within a 100-m radius of each study building. This dual-source approach was adopted to ensure the accuracy and comprehensiveness of the information.

Nevertheless, whenever discrepancies were identified between the data recorded in the municipal information system and the conditions observed in the field—particularly with respect to road conditions, urban infrastructure such as water, electricity, and gas networks, and facilities surrounding the sample buildings—the existing conditions and findings obtained through field observations were treated as the primary basis for analysis and assessment. This decision was based on the assumption that current on-site conditions provide a more accurate and up-to-date representation of the area's infrastructure and therefore constitute a more reliable basis for subsequent analyses and the development of context-sensitive recommendations.

Economic variables

In the economic dimension, data were collected using several complementary methods to provide a comprehensive and accurate representation of existing conditions. Information on the employment–income variable was obtained through the design and administration of standardized questionnaires. Average housing prices were estimated through a survey of experienced experts active in the housing market. Housing quantity was determined based on information obtained from building completion certificates. Finally, housing quality was assessed through direct observation and field investigation.

Social variables

For the social dimension, data on population density at the neighborhood level were obtained from the municipal information database, while the remaining social variables were collected through questionnaires. The questionnaire identified the social characteristics of residents in the study buildings. Accordingly, the statistical population consisted of residents of the selected buildings, and purposive, non-probability sampling was employed.

Respondents ranged in age from 14 to 76 years, and all resided in the buildings under investigation. The questions were designed as closed-ended items to generate quantitative data, with predefined response options based on a Likert scale. Cronbach's α was used to evaluate the reliability and internal consistency of the questionnaire.

In total, 98 structured interviews focusing on residents' social characteristics were conducted. Table 3 presents the characteristics examined, including sex, age, health status, literacy level, and economic conditions. Section 4.4 (Sample Selection) provides further details on the statistical population, while Section 4.5 (Data Analysis) describes the statistical analysis procedures.

Managerial variables

For the managerial dimension, data related to the research variables were collected through two procedures. Information concerning the level of urban-management preparedness for earthquakes, including the availability of essential facilities and equipment, was extracted from the comprehensive municipal database. Information on the availability of multipurpose centers, as well as appropriate signs and wayfinding systems to facilitate rapid and easy access to these centers, was collected through direct observation and detailed field investigations.

In accordance with the objective of the study, data for the physical, infrastructural, economic, social, and managerial dimensions were collected through the following methods: 12 variables through field observation and investigation, four variables from the municipal database, four variables from official government documents, six variables through face-to-face interviews with residents, and one variable through an expert survey (Table 4).

Data processing

To convert the collected data into a manageable dataset and facilitate its representation, examination, and analysis, the data processing procedure was carried out with

Table 4. Data collection methods (authors' compilation)

Dimension	Variables	Data Type	Measurement Method	Data Source
Physical	Structural type	Quantitative	Document review	Building completion certificate
	Structural quality	Qualitative	Observation and field survey	Building
	Lateral-force-resisting system	Quantitative	Observation and field survey	Building
	Building age	Quantitative	Building completion certificate	Building
	Structural dimensions	Quantitative	Document review	Deed and completion certificate
	Structural separation distances	Quantitative	Observation and field survey	Building
Infrastructural	Percentage of residential land use	Quantitative	Document review	Municipal database
	Access to transportation network and major roads	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Quality of adjacent road under hazardous conditions	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Access to open and safe spaces	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Access to emergency-service land uses (healthcare, fire, police)	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Distance from hazardous areas, sites, and land uses	Quantitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Access to urban utilities and services (water, electricity, gas, telephone, internet, etc.)	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings
Economic	Employment–income status	Quantitative	Questionnaire	Residents
	Average housing price	Quantitative	Expert survey	Expert
	Housing quantity	Quantitative	Document review	Building completion certificate
	Housing quality	Qualitative	Observation and field survey	Residential unit
Social	Population density in the area	Quantitative	Document review	Municipal database
	Total number of residents	Quantitative	Questionnaire	Residents
	Physical health status – mean age	Qualitative	Questionnaire	Residents
	Sex ratio	Quantitative	Questionnaire	Residents
	Household size	Quantitative	Questionnaire	Residents
	Literacy rate	Quantitative	Questionnaire	Residents
Managerial	Level of preparedness in the event of an earthquake	Qualitative	Document review	Municipal database
	Availability of multipurpose and emergency centers	Quantitative	Observation and field survey	Building surroundings
	Essential facilities and equipment	Qualitative	Document review	Municipal database
	Appropriate signs and wayfinding systems	Qualitative	Observation and field survey	Building surroundings

Table 5. Buildings examined in the city

Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	Sample 10
Hashemieh	Hejab	Haft Tir	Farhang	Emamat	Motahhari	Abadi	Amel	Kamab	Khajehrabi
									

precision and close attention. In this regard, Microsoft Excel (2021) was used as the primary data management tool. Specifically, a comprehensive profile was created for each building sample, and all initial raw data, including the values of 27 predefined variables, were recorded and documented therein. These structured profiles provided a reliable information source for precise, in-depth analyses in the subsequent stages of the study.

Data cleaning and management of missing data

Before any analysis, the data were examined for entry errors, inconsistencies, and omissions. This process emphasized identifying and managing outliers and missing data. During this stage, missing data were handled in two ways: when missing data for a variable were less than 5%, case deletion was performed; and when a random missingness pattern was detected, mean imputation was used for continuous variables (Osborne et al., 2004). Any data inconsistencies in the data were also resolved through re-examination.

Conversion of qualitative data to quantitative data and coding

Given the multivariate and mixed nature of the study (quantitative and qualitative), qualitative data had to be converted into quantitative form for statistical analysis. This was achieved using a combination of validated coding, content analysis, and scaling methods. For open-ended qualitative variables, such as expert opinions, conventional content analysis was applied (Elo and Kyngäs, 2008). This process included unitization, open coding, axial coding, and ultimately assigning a numerical value to each category. For quantifying observed variables collected through instruments such as Likert-scale questionnaires, ordinal methods were used.

Table 6. Preference scale between two parameters in AHP (Saaty, 1977)

Weight	Degree of Preference	Description
1	Equally preferred	Two factors are of equal importance.
3	Moderately preferred	One factor is slightly preferred over the other.
5	Strongly preferred	One factor is preferred over the other.
7	Very strongly preferred	One factor is very strongly preferred over the other.
9	Extremely preferred	One factor is absolutely preferred over the other.
2, 4, 6, 8	Intermediate preferred	Intermediate preferences between 1, 3, 5, 7, and 9.
Reciprocal values	Opposite preferred	One factor is the inverse of the other.

Table 7. Spearman correlation matrix (findings of the present study)

Variables	Structural type	Structural quality	Lateral restraint system	Building age	Structural dimensions	Structural spacing	Residential land-use %	Access to transport network	Access to open & safe space	Access to emergency land uses	Distance from high-risk areas	Access to urban services	Employment-income status
Structural type													
Structural quality	0.941												
Lateral restraint system	0.944	0.870											
Building age	0.693	0.675	0.475										
Structural dimensions	0.624	0.494	0.636	0.657									
Structural spacing	0.587	0.438	0.443	0.869	0.782								
Residential land-use %	-0.789	-0.816	-0.650	-0.658	-0.405	-0.436							
Access to transport network	0.832	0.858	0.816	0.542	0.574	0.395	-0.628						
Adjacent pathway quality	0.843	0.798	0.881	0.429	0.538	0.385	-0.511	0.947					
Access to open & safe space	0.932	0.919	0.853	0.639	0.445	0.439	-0.895	0.680	0.662				
Access to emergency land uses	0.698	0.711	0.442	0.888	0.343	0.654	-0.801	0.454	0.349	0.759			
Distance from high-risk areas	0.717	0.752	0.524	0.790	0.333	0.562	-0.909	0.465	0.371	0.848	0.921		
Access to urban services	0.752	0.841	0.580	0.694	0.274	0.411	-0.729	0.794	0.689	0.702	0.795	0.708	
Employment-income status	0.142	0.118	0.003	0.257	-0.116	0.085	-0.188	-0.118	-0.126	0.230	0.502	0.298	0.339

Variables	Structural type	Structural quality	Lateral restraint system	Building age	Structural dimensions	Structural spacing	Residential land–use %	Access to transport network	Adjacent pathway quality	Access to open & safe space	Access to emergency land uses	Distance from high–risk areas	Access to urban services	Employment–income status	Average housing price	Housing quantity	Housing quality	Population density	Total number of residents	Health status	Sex ratio	Household size	Literacy rate	Preparedness level	Crisis center	Facilities and equipment	Signs and guidance
Average housing price	0.823	0.878	0.658	0.799	0.394	0.480	-0.798	0.687	0.596	0.864	0.886	0.846	0.867	0.455													
Housing quantity	0.447	0.568	0.492	0.170	0.200	-0.018	-0.736	0.401	0.300	0.622	0.312	0.599	0.362	-0.043	0.431												
Housing quality	0.923	0.928	0.830	0.678	0.489	0.483	-0.950	0.720	0.664	0.982	0.780	0.882	0.745	0.169	0.851	0.691											
Population density	-0.734	-0.673	-0.536	-0.766	-0.358	-0.588	0.699	-0.451	-0.422	-0.750	-0.910	-0.772	-0.760	-0.720	-0.868	-0.212	-0.728										
Total number of residents	0.090	-0.063	0.076	0.352	0.394	0.640	-0.084	-0.251	-0.158	0.090	0.231	0.307	-0.190	0.031	-0.031	0.068	0.115	-0.172									
Health status	0.383	0.372	0.225	0.302	-0.116	0.267	-0.588	0.322	0.325	0.425	0.513	0.585	0.535	-0.052	0.315	0.298	0.497	-0.359	0.111								
Sex ratio	-0.544	-0.531	-0.449	-0.553	-0.176	-0.406	0.227	-0.364	-0.440	-0.482	-0.605	-0.438	-0.611	-0.628	-0.708	0.079	-0.398	0.745	-0.123	-0.061							
Household size	0.031	0.000	0.212	-0.492	-0.091	-0.430	0.074	0.173	0.257	0.024	-0.517	-0.321	-0.299	-0.695	-0.308	0.103	-0.012	0.527	-0.431	0.006	0.515						
Literacy rate	0.877	0.873	0.747	0.799	0.505	0.553	-0.711	0.743	0.706	0.850	0.819	0.752	0.825	0.410	0.969	0.304	0.816	-0.857	-0.009	0.238	-0.766	-0.237					
Preparedness level	0.975	0.956	0.896	0.726	0.620	0.583	-0.817	0.913	0.876	0.892	0.710	0.725	0.833	0.062	0.835	0.466	0.913	-0.693	0.000	0.449	-0.485	0.031	0.871				
Crisis center	0.917	0.872	0.808	0.767	0.587	0.612	-0.920	0.701	0.660	0.957	0.808	0.894	0.698	0.169	0.863	0.587	0.966	-0.758	0.211	0.460	-0.434	-0.049	0.859	0.904			
Facilities and equipment	0.902	0.895	0.765	0.799	0.590	0.634	-0.940	0.796	0.706	0.896	0.823	0.876	0.813	0.095	0.844	0.577	0.950	-0.728	0.124	0.569	-0.364	-0.082	0.821	0.943	0.956		
Signs and guidance	0.402	0.450	0.480	-0.037	-0.067	-0.190	-0.571	0.269	0.303	0.580	0.252	0.475	0.341	0.309	0.411	0.816	0.576	-0.350	0.012	0.302	-0.202	0.031	0.326	0.354	0.477	0.394	

Table 8. Variance explained by the extracted principal components (PCA method)

Component	Eigenvalue	Component Variance (%)	Cumulative Variance (%)
1	9.21	34.12	34.12
2	4.87	18.04	52.16
3	3.55	13.15	65.31
4	2.41	8.93	74.24
5	2.18	8.08	82.32

Control, validity, and reliability

The content validity of the questionnaire and the coding framework was established through expert review. In addition, exploratory factor analysis was employed to assess the construct validity of the scales used.

The internal consistency reliability of the Likert-scale questionnaires was assessed using Cronbach's α, which was 0.73, indicating acceptable reliability. To assess the reliability of the qualitative coding process, intercoder reliability was examined. Accordingly, 20% of the samples were independently coded by two coders, and agreement was measured using Cohen's kappa coefficient. The kappa value was 0.82, indicating strong agreement.

Quality control throughout the process

Quality control was a continuous process. In addition to the above measures, the overall logic and integrity of the data after quantification were re-examined using descriptive statistics and box plots to identify any remaining anomalies. This systematic approach ensured the accuracy, validity, and reliability of the data for advanced statistical analysis and decision-making in later stages of the study.

Sample selection

The sample selection process, aimed at an operational assessment of seismic resilience, was conducted using a scientific and multi-criteria approach. For this purpose, a combined sampling method comprising cluster, random, and stratified techniques was employed. In this method, the city was first divided into separate zones based on homogeneity in physical, infrastructural, economic, social, and managerial criteria. This initial classification identified two main urban fabrics: the deteriorated fabric and the middle-new fabric, each with its own characteristics and resilience challenges. In the next stage, several neighborhoods were selected from each fabric as sample clusters to adequately cover the existing diversity within each fabric. Finally, within each sample cluster, buildings were randomly selected for more precise and detailed assessments. This combined sampling method, by ensuring adequate coverage and sufficient representation of urban fabric diversity, guarantees that the resilience assessment results are valid and can be generalized to other similar areas of the city.

The sample buildings were selected from among the common residential apartments in Mashhad City for the middle social class. The selected plots ranged from 150 to 300 square meters, and the number of floors ranged from 3 to 6. In total, 51 residential units from 10 buildings, with a population of 109 individuals and 51 families, were selected, with a gender ratio of 53.56 (female to male). Table 5 presents the site map and a photo of the main facade of the selected samples.

Data analysis

Given its multidimensional nature, seismic resilience assessment requires an approach capable of both handling data complexity and reflecting the relative importance of different criteria. To achieve this objective, the present study employed a hybrid framework combining principal component analysis (PCA) and the analytic hierarchy process (AHP). This integration merges the objectivity of statistical analysis with expert judgment to achieve a comprehensive and balanced assessment (Martínez et al., 2012).

Data preprocessing

To prepare the data for analysis, preprocessing focused on Z-score normalization. The main reason for this step was the difference in the measurement scales of the variables. Standardization, by converting all variables to a dimensionless scale with a mean of zero and a standard deviation of one, prevents the possible dominance of variables with higher variance. This essential step is a necessary prerequisite for performing PCA and significantly improves the accuracy and reliability of the results (Freire-Garv. et al., 2016). In addition, the Shapiro–Wilk test was used to examine the normality of the data distribution, and the corresponding P value was calculated.

Table 9. Factor loadings of variables for each component (PCA method)

Variables	F1	F2	F3	F4	F5
Structural type	0.861				
Structural quality	0.958				
Lateral restraint system	0.823				
Building age	0.697				
Structural dimensions	0.465				
Structural spacing	0.678				
Residential land-use percentage		-0.960			
Access to transportation network		0.805			
Adjacent pathway quality		0.731			
Access to open and safe space		0.869			
Access to emergency land uses		0.802			
Distance from high-risk areas		0.878			
Access to urban services		0.846			
Employment-income status			0.366		
Average housing price			0.897		
Housing quantity			0.672		
Housing quality			0.996		
Population density in the area				-0.749	
Total number of residents				0.546	
Health status				0.541	
Sex ratio				-0.583	
Household size				-0.687	
Literacy rate				0.919	
Preparedness level					0.752
Crisis center					0.862
Facilities and equipment					0.977
Signs and guidance					0.567

Table 10. Weights of the criteria and subcriteria of seismic resilience (AHP method)

Rank	Subcriterion	Subcriterion Weight	Subcriterion Consistency Ratio	Criterion	Criterion Weight	Criterion Consistency Ratio
1	Structural type	0.278	0.032	Physical	0.5421	0.06
	Structural quality	0.326				
	Lateral restraint system	0.130				
	Building age	0.097				
	Structural dimensions	0.105				
	Structural spacing	0.064				
2	Residential land-use percentage	0.376	0.073	Infrastructure	0.2001	0.06
	Access to transportation network	0.228				
	Adjacent pathway quality	0.137				
	Access to open and safe space	0.087				
	Access to emergency land uses	0.088				
	Distance from high-risk areas	0.057				
	Access to urban services	0.027				
3	Preparedness level	0.296	0.053	Management	0.1124	0.06
	Crisis center	0.069				
	Facilities and equipment	0.515				
	Signs and guidance	0.121				
4	Population density in the area	0.083	0.080	Social	0.0839	0.06
	Total number of residents	0.116				
	Health status	0.097				
	Sex ratio	0.012				
	Household size	0.114				
	Literacy rate	0.578				
5	Employment-income status	0.212	0.062	Economic	0.0615	0.06
	Average housing price	0.047				
	Housing quantity	0.153				
	Housing quality	0.588				

Principal component analysis

PCA was conducted to reduce data dimensionality, identify the underlying structure, and objectively determine the most influential set of variables affecting seismic resilience. The analysis was based on the correlation matrix derived from the 27 standardized variables. At the beginning of the process, the Spearman correlation coefficient was calculated for each pair of variables and assembled into a matrix. Then, the eigenvalues and eigenvectors of the covariance matrix, which can determine the direction of data dispersion, were calculated. To ensure the validity of the results, collinearity, sample adequacy, and sufficient correlation among variables were assessed using the Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) measure and Bartlett's test of sphericity.

To determine the optimal number of principal components, variables with eigenvalues greater than 1 were retained. In addition, a scree plot was used to identify the elbow point. The elbow point in the scree plot, representing a sharp reduction in the slope of the curve, was considered an indicator for determining the optimal number of principal components.

To simplify the factor structure and facilitate interpretability, varimax rotation was applied. Variables with an absolute factor loading greater than 0.6 on a component were identified as influential variables in that dimension. Variables whose loadings did not reach this threshold on any component, or that loaded simultaneously on multiple components, were removed from the final analysis. The output of PCA provided an objective reduced set of variables, which served as the basis for the hierarchical analysis structure.

Analytic hierarchy process

In the next step, to assign weights to the criteria and sub-criteria identified through PCA, the AHP method developed by Saaty (1977) was used. For data collection in this section, a pairwise comparison questionnaire based on Saaty's 9-point scale (Table 6) was designed, and 6 experts with academic and executive experience in construction, urban planning, and crisis management were asked to compare the relative importance of the main criteria extracted from PCA, as well as the sub-criteria within each criterion. For each pairwise comparison, a comparison matrix was constructed, and the final weight of each factor was calculated using the geometric mean of expert judgments and the eigenvector method. To ensure the reliability of the judgments, the consistency ratio (CR) was calculated for each matrix. Accordingly, only matrices with a consistency ratio of less than or equal to 0.1 were considered acceptable. Otherwise, the judgments were returned to the experts for revision. The final average consistency ratio for all matrices was 0.06, indicating consistent and reliable judgments.

Integration of principal component analysis and analytic hierarchy process results

The final output of this hybrid process was the determination of a final weight for each resilience indicator. These weights were calculated by multiplying the weight of each indicator at its level in the hierarchical structure by the weight of the corresponding upper-level criterion (the principal component in which the indicator was placed). These integrated weights simultaneously reflect both the intrinsic importance of each indicator based on expert judgment and its role within the overall resilience structure based on data analysis. Ultimately, these weights formed the basis for calculating the resilience score for each residential apartment examined in Mashhad City.

Results

Descriptive statistics and normality assessment

The data in this study comprised 27 quantitative variables under five criteria: physical, infrastructural, economic, social, and managerial, which were collected for the samples. Prior to conducting multivariate analyses, the normality of the data distribution was examined using the Shapiro–Wilk test. The results showed that most variables (23 variables) did not meet the assumption of normality ($P<0.05$). Accordingly, nonparametric methods, particularly the Spearman correlation coefficient and factor analysis based on the Spearman correlation matrix, were used for subsequent analyses.

Assessment of data adequacy and significance of correlations

Before extracting the principal components, the prerequisites for factor analysis were evaluated using the KMO measure and Bartlett's test. The K KMO value, which assesses sampling adequacy, was 0.842, exceeding the acceptable threshold of 0.7 and indicating a high level of data adequacy for factor analysis. Bartlett's test, used to assess the overall significance of the correlation matrix, yielded an approximate chi-square value of 2187.34 with a significance level of $P<0.001$, leading to the rejection of the null hypothesis (that the correlation matrix is identical to the identity matrix). This result indicates sufficient

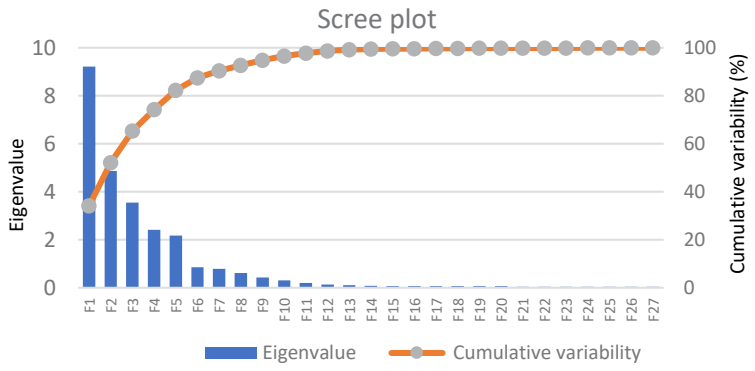


Figure 3. Scree plot of eigenvalues for extracted components (PCA method)

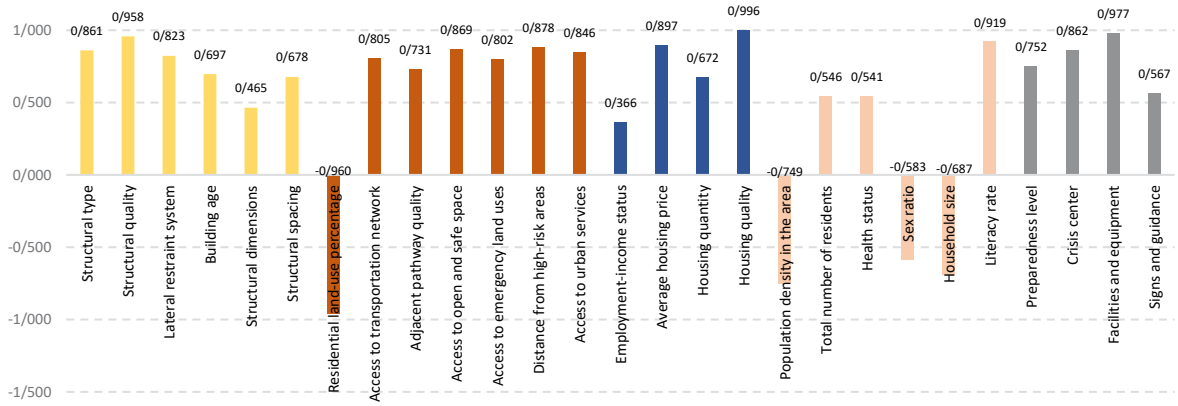


Figure 4. Factor loadings of the variables (based on the data presented in table 9)

and significant correlations among the variables for factor analysis.

Analysis of the Spearman correlation matrix

Examination of the Spearman correlation matrix presented in Table 7 revealed significant patterns among the variables. In summary, the strongest significant positive correlations ($P<0.01$, $rs>0.7$) were observed among the variables related to the physical component. In addition, notable positive correlations were found between housing quality, literacy rate, and essential facilities and equipment

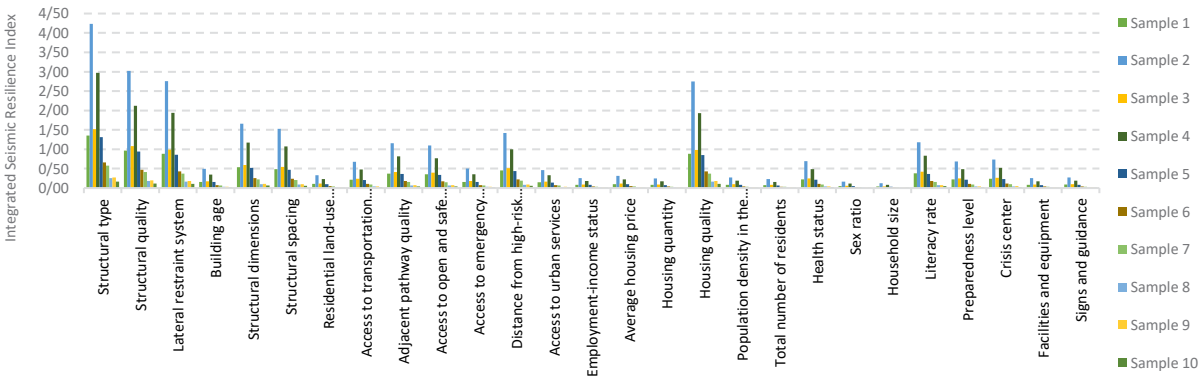


Figure 5. Integrated seismic resilience comparison of the samples by variable (AHP method)

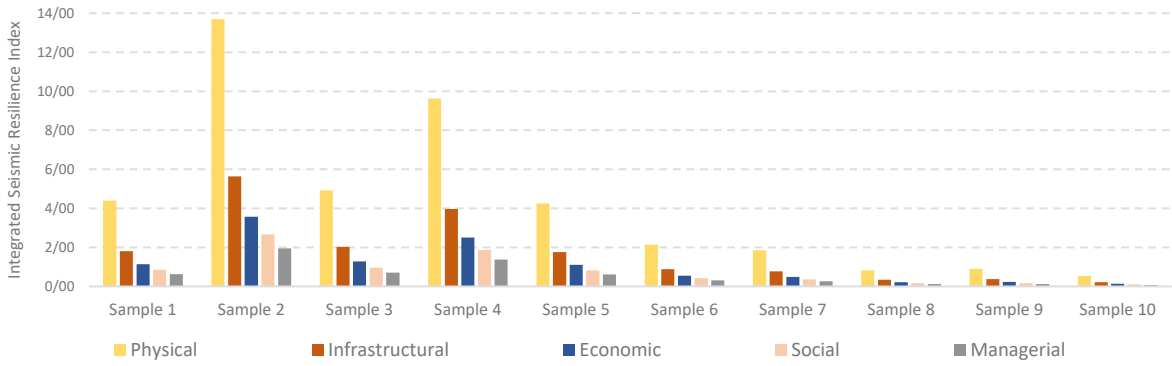


Figure 6. Integrated Seismic Resilience Comparison of the Samples by Criterion (AHP Method)

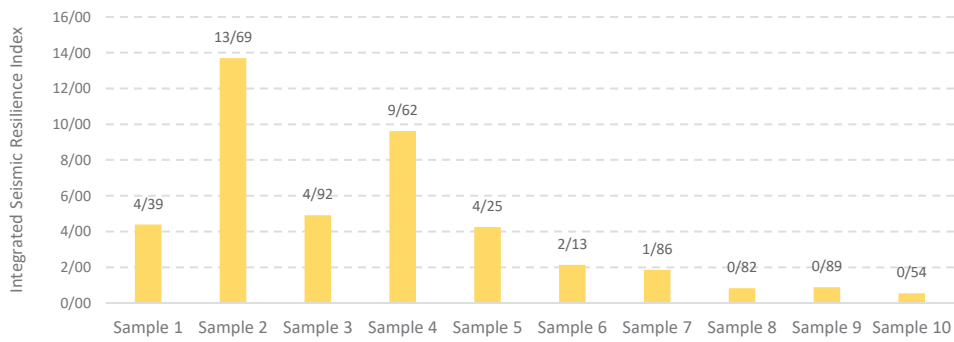


Figure 7. Integrated seismic resilience comparison of the samples in the physical dimension (AHP method)

with other variables. On the other hand, significant negative correlations were identified between the percentage of residential land use in the infrastructural component and other variables ($P<0.05$, $rs \approx -0.65$). These findings preliminarily confirm the presence of latent dimensions and an underlying structure in the data.

Principal component extraction

To reduce data dimensionality, PCA was employed using Varimax rotation, guided by two criteria: eigenvalues greater than 1 and the scree plot. The scree plot (Figure 3) shows a clear break (elbow point) after the fifth component, confirming the extraction of five principal components.

Ultimately, five principal components were extracted, which collectively explain 82.32% of the total data variance. Table 8 presents the variance explained by each component.

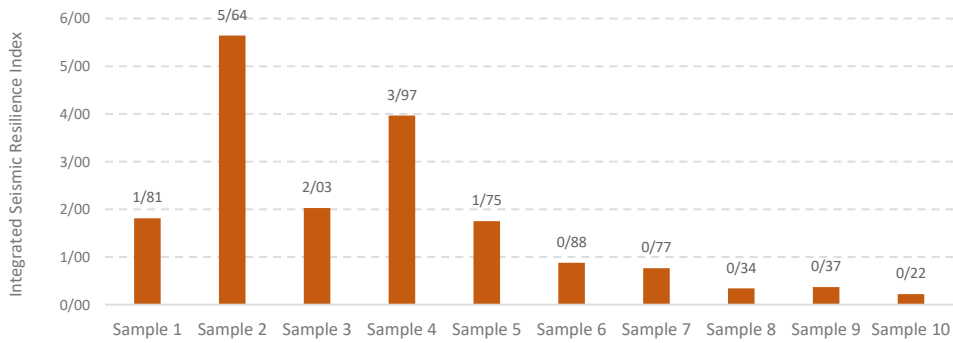


Figure 8. Integrated seismic resilience comparison of the samples in the infrastructural dimension (AHP method)

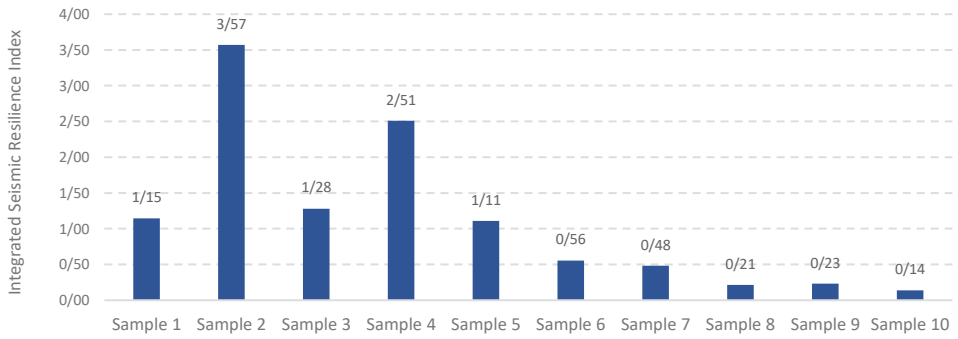


Figure 9. Integrated seismic resilience comparison of the samples in the economic dimension (AHP method)

Following the initial component extraction, Varimax rotation was utilized to simplify their interpretation. This rotation aims to maximize the variance between factors, ensuring that each variable exhibits a high factor loading on only one factor. This process facilitates easier labeling and interpretation of the factors. Table 9 and Figure 4 present the factor loadings of the variables following Varimax rotation, indicating the component to which each variable belongs.

Determination of criterion weights

To assign weights to the criteria and integrate them into a final composite index, the AHP was employed. The data required for this method were collected through a pairwise-comparison questionnaire based on experts' opinions. After the questionnaires were collected, a pairwise-comparison matrix was constructed for each expert, and the weight of each criterion and its corresponding consistency ratio were calculated. The geometric mean of the opinions of all experts was considered the final pairwise comparison. The weights of the criteria, subcriteria, and the final consistency ratio were calculated, and the results are presented in Table 10. As shown, the final CR value was 0.06, which is lower than 0.1 and indicates the high reliability and consistency in the experts' judgments.

Based on a comprehensive analysis of the collected data and the results obtained from the multicriteria assessment of seismic-resilience indicators, Figures 5 and 6 show the conditions of the ten selected residential buildings in Mashhad City. The findings indicate that Sample 2 achieved the highest scores for most of the evaluated variables and was identified as the most resilient building among the examined samples. In contrast, Sample 10 received the lowest scores for most indicators and was assessed as the most vulnerable building to earthquake hazards. Buildings in the central and old urban fabric generally demonstrated the lowest resilience compared with those in other areas. In contrast, buildings in the new urban fabric of Mashhad City were in considerably better condition in terms of seismic resilience and exhibited greater resilience to the effects of earthquakes.

Discussion

Assessment of seismic resilience from a physical perspective

Several variables can represent physical resilience; however, in the present study, the variables that had received the greatest emphasis in the literature and also met the requirements of precise measurement and accessibility—namely,

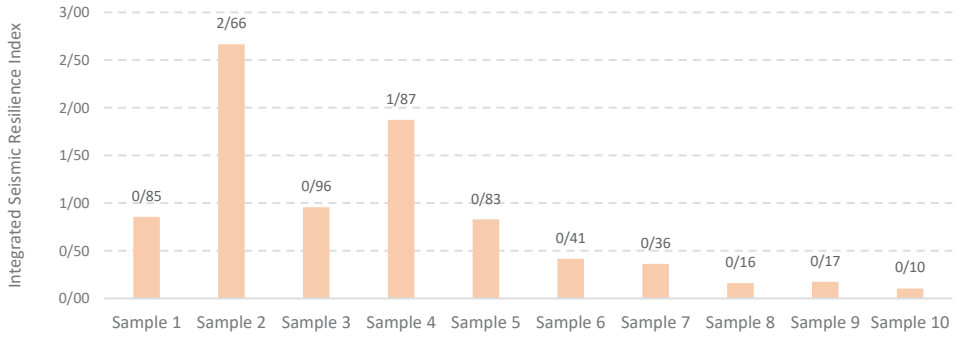


Figure 10. Integrated seismic resilience comparison of the samples in the social dimension (AHP method)

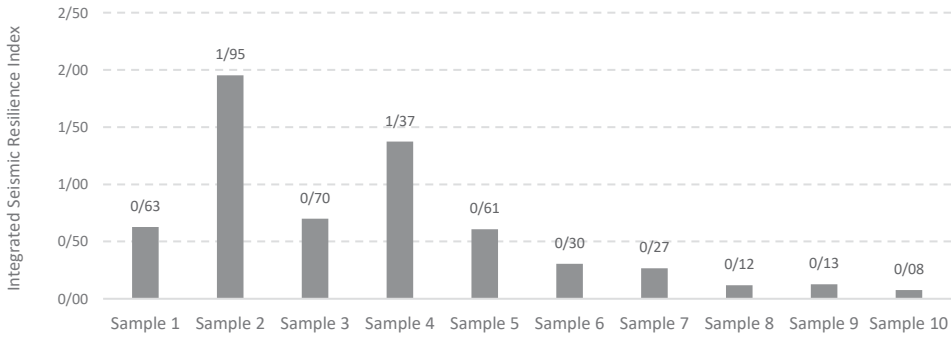


Figure 11. Integrated seismic resilience comparison of the samples in the managerial dimension (AHP method)

structural type, structural quality, lateral restraint system, building age, structural dimensions, and structural spacing—were examined. Among these, structural type, structural quality, and the lateral restraint system play a more important role in ensuring seismic resilience and are the most relevant predictors. A strong correlation is observed between seismic resilience and these variables, although it sometimes leads to inaccurate conclusions.

Although apartments with more than four floors accommodate more people and have higher asset value, their construction methods, quality, and materials generally reduce the risk of collapse and increase resilience. Buildings with lower resilience are, for the most part, low-rise and located in the city's old urban fabric (Figure 7).

Assessment of seismic resilience from an infrastructural perspective

The variables examined in the present study to assess infrastructural resilience include the percentage of residential land-use coverage within the surroundings of the building under study, the accessibility conditions of the building to the transportation network and main pathways, the quality of the adjacent pathway under hazardous conditions, access to open and safe space, access to emergency land uses (medical, firefighting, and police services), distance from hazardous zones, locations, and land uses, and access to urban services (water, electricity, gas, telephone, internet, etc.).

The high density of urban buildings reduces resilience, as it can create obstacles in the event of seismic damage. In central urban areas, building collapse can block access to the area, whereas in newer areas—which have a higher proportion of open spaces and lower housing density—resilience is increased (Figure 8). Moreover, distance from emergency and service centers, ease of circulation, and distance from hazardous locations are significantly associated with survival probability and enhanced resilience.

Assessment of seismic resilience from an economic perspective

Seismic resilience conditions from an economic perspective were evaluated based on employment–income status, average housing price, housing quantity, and housing quality, among which housing quality exerted the greatest influence on seismic resilience. Figure 9 shows the condition of the examined samples from this perspective.

Evaluating the data trends for economic variables across the ten examined samples indicates that the housing quality parameter serves as a highly decisive indicator of resilience from an economic perspective.

Assessment of seismic resilience from a social perspective

The population exposed to earthquakes is the most critical variable to consider when assessing seismic resilience. To evaluate seismic resilience from a social perspective, population density in the area, total number of residents, physical health status (average age), sex ratio, household size, and literacy rate were examined. Among these, the literacy rate played a more prominent role in ensuring seismic resilience. Figure 10 shows the conditions of the examined samples from a social perspective.

In addition to the literacy rate variable, individuals' health status is also closely associated with ensuring resilience conditions. Accordingly, it can be concluded that variables fostering resilience in the social dimension share substantial common ground with the quality of social life as well as cultural and educational components of society.

Assessment of seismic resilience from a managerial perspective

Managerial variables influencing seismic resilience are highly complex and multifaceted; however, they can generally be examined across two stages: pre-earthquake and post-earthquake measures. In this study, the level of urban management preparedness in the event of an earthquake, the presence of multipurpose and crisis centers within the catchment radius of the examined samples, essential facilities and equipment anticipated prior to a crisis, and the installation of appropriate signs and guidance for emergency access were among the evaluated variables against which the conditions of the examined samples could be compared (Figure 11).

Principal components of seismic resilience

The PCA results indicate significant correlations between the studied variables and the level of seismic resilience in buildings. Based on this analysis, the physical component, as one of the most critical principal components, exerts the greatest impact on determining the level of seismic resilience. Meanwhile, given the direct relationship between the evaluated parameters and the resilience indicators, it can be asserted that housing quality—with a factor loading of 0.99-is the most critical parameter.

Conclusion

By presenting an integrated, quantitative framework, this research has transformed seismic resilience from a theoretical concept into an operational and measurable scale for Mashhad City. The findings clearly demonstrate that investment solely in engineering, without simultaneous attention to social and managerial components, is not a comprehensive strategy for increasing resilience. The model presented in this study is not only a powerful tool for urban planners and crisis managers in Mashhad City but can also be utilized as a methodological model for other Iranian metropolises facing similar challenges. Implementing the proposed solutions based on scientific prioritization can significantly increase the seismic resilience of the Mashhad metropolis and prevent a natural event from turning into a widespread human catastrophe.

Quantitative analyses using a combination of AHP and PCA showed that physical and infrastructural indices accounts for 74.22% of total resilience, making them for more prominent than other dimensions. Among the variables affecting resilience, housing quality (factor loading 0.996), essential facilities and equipment (factor loading 0.977), residential land-use percentage (factor loading -0.960), structural quality (factor loading 0.958), and literacy rate (factor loading 0.919) have the greatest impact on the calculation of integrated resilience. On the other hand, although socio-economic indices with a cumulative weight of 14.54% have a smaller share in ensuring resilience, the factor loadings of the housing quality (0.996) and literacy rate (0.919) variables indicate that the concentration of low-income and low-literacy populations, especially in deteriorated urban fabrics, is a critical risk-intensifying point; consequently, in these neighborhoods, the resilience index in the social dimension is at its lowest compared to other parts of the city.

Given the obtained quantitative findings, strategies for improving urban resilience are categorized and presented in three priorities: short-term, medium-term, and long-term. The first priority, which has a short-term nature and involves physical-managerial interventions, focuses on implementing emergency programs, technical audits, and retrofitting buildings, especially in areas with a construction quality index lower than 0.5. Supplying and equipping urban spaces with essential facilities and removing physical barriers to accessing these spaces are also considered vital measures. In the second priority, with a medium-term approach based on capacity building in the infrastructural sector, creating and increasing the per capita open space in areas identified as high-risk centers with very low resilience should be on the agenda. In parallel, developing an integrated building information system for continuous monitoring and updating of physical indices is essential. Finally, the third priority, with a long-term horizon focused on social empowerment, emphasizes implementing targeted educational programs for residents of high-risk neighborhoods with crisis response content, tailored to the socio-economic characteristics of the local community. Improving citizens' literacy and awareness is also considered an integral part of this long-term priority.

Limitations

In this research, to focus on the functional comparison of the options under study within Mashhad's urban fabric, climatic and geographic parameters, as well as earthquake occurrence scenarios, were considered identical for all options. However, climatic conditions, geographic location, and the intensity of potential earthquakes can potentially exert different effects on the seismic resilience of each option. Additionally, the cybersecurity and information security variable, especially in the managerial sector, is recognized as an influential and determining factor. Nevertheless, due to existing limitations in accessing reliable sources and sufficient data, this variable was not ac-

curately evaluated in the research. It is recommended that future research address and investigate this aspect.

Furthermore, despite utilizing PCA as an objective basis for initial weighting, the judgment and evaluation phase in the AHP has a subjective nature. To reduce this inherent limitation, the consistency ratio control criterion was strictly and precisely applied. Moreover, significant efforts were made to utilize the opinions and expertise of experienced experts in this field. However, reaching a complete consensus in all pairwise comparisons was a difficult and challenging task. To mitigate this challenge, the geometric mean of expert opinions was employed, which helped alleviate this limitation to some extent.

Finally, it should be noted that the generalizability of this research's findings is limited to Mashhad's urban fabric, and the weights obtained are specific to this region. Therefore, to use these results in other cities, the localization process must be carried out separately, proportional to the specific conditions and characteristics of each city.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

In this study, all ethical principles were observed. No experiments on human or animal samples were conducted. Therefore, no ethical approval code was needed.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

Conceptualization, methodology, investigation, funding acquisition and writing: Ehsan Biglari and Ali Biglari; Supervision: Ali Biglari.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank

فصلنامه علمی
دانش پیشگیری و مدیریت بحران

مقاله پژوهشی

ارزیابی چندمعیاره شاخص‌های تاب‌آوری لرزه‌ای در مسکن آپارتمانی شهری مشهد؛ بررسی ده نمونه موردی

احسان بیگلری[۱]، *علی بیگلری[۲]

۱. گروه معماری، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران، مرکز تحقیقات مدیریت مخاطرات طبیعی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گلستان، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation Biglari, E., & Biglari, A. (2026). [Multicriteria Assessment of Seismic Resilience Indicators in Urban Apartment Housing in Mashhad, Iran: An Examination of Ten Case Studies (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, *16*(2):214-263. https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.965.1

https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.965.1

چکیده

زمینه و هدف در راستای تقویت تاب‌آوری لرزه‌ای، شناسایی دقیق و جامع مؤلفه‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری و تعیین کمی میزان تأثیر هر متغیر به‌صورت یکپارچه و سیستماتیک، اساسی‌ترین و راهبردی‌ترین رویکرد محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی میزان تاب‌آوری لرزه‌ای، از طریق به‌کارگیری روش‌های تحلیل چندمعیاره، با در نظر گرفتن ابعاد گوناگون شامل مؤلفه‌های کالبدی، زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی انجام شده است. این رویکرد جامع، امکان شناسایی نقاط ضعف و قوت در هریک از این حوزه‌ها را فراهم آورده و بستری مناسب برای تدوین برنامه‌های مداخله‌ای اثربخش با هدف ارتقای تاب‌آوری در برابر زلزله ایجاد می‌نماید.

روش این پژوهش، رویکردی سیستماتیک دارد. در گام نخست، شاخص‌های تأثیرگذار بر تاب‌آوری از طریق بررسی جامع ادبیات موضوع استخراج و متغیرهای مؤثر بر هریک از شاخص‌ها شناسایی گردید. سپس با بهره‌گیری از تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و فرآیند پردازش داده‌ها، عوامل اصلی و کلیدی تعیین شد. در ادامه، با انتخاب ده آپارتمان مسکونی در نقاط مختلف شهر مشهد، وضعیت تاب‌آوری این ساختمان‌ها طی یک فرآیند ارزیابی چندمعیاره و به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت، شاخص تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه، به‌عنوان معیاری جامع برای ارزیابی تاب‌آوری کلی ساختمان‌ها، از طریق جمع مقادیر وزنی شاخص‌های استانداردشده، محاسبه گردید. این شاخص، امکان مقایسه و رتبه‌بندی ساختمان‌ها براساس میزان تاب‌آوری آن‌ها در برابر زلزله را فراهم می‌سازد.

یافته‌ها نتایج تحلیل مؤلفه اصلی همبستگی‌های مهمی را بین متغیرهای موردبررسی و تاب‌آوری لرزه‌ای نشان می‌دهد. در میان مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه کالبدی بیشترین تأثیر را بر میزان تاب‌آوری لرزه‌ای دارد. همچنین با در نظر گرفتن ارتباط بین پارامترها و شاخص‌های تاب‌آوری، کیفیت مسکن با بار عاملی ۰/۹۹۶ بیشترین نقش را در تأمین تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی شهر مشهد دارد.

نتیجه‌گیری این پژوهش با ارائه یک چارچوب جامع برای سنجش تاب‌آوری، نه‌تنها آسیب‌پذیری‌های موجود را شناسایی می‌کند، بلکه پیش‌نیازی ضروری برای طراحی و اجرای اقدامات پیشگیرانه هدفمند و کارآمد است. این اقدامات، با در نظر گرفتن الگوهای فضایی آسیب‌پذیری شناسایی‌شده، به‌عنوان بخشی از یک رویکرد تاب‌آور می‌توانند به‌طور مؤثری از خسارات ناشی از زلزله بکاهند. بااین‌حال، تحقق کامل اهداف این پژوهش مستلزم تکرار آن در سایر نقاط کشور و در سطح ملی است تا بتوان تصویری جامع از وضعیت تاب‌آوری لرزه‌ای در سطح کلان به دست آورد و براساس آن، برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تری انجام داد.

کلیدواژه‌ها محیط ساخته‌شده، تاب‌آوری لرزه‌ای، کاربری مسکونی، ارزیابی چندمعیاره، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

اطلاعات مقاله:
تاریخ دریافت: ۰۳ تیر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۲۱ مهر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* **نویسنده مسئول:**
دکتر علی بیگلری
نشانی: گلستان، دانشگاه گلستان، دانشکده مهندسی گرگان، پژوهشکده مدیریت بحران و پدافند غیر عامل، گروه مهندسی عمران.
تلفن: ۵۰۵۶۶۱۵ (۹۱۵) ۹۸+
پست الکترونیکی: a.biglari@gu.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

کلان‌شهر مشهد به‌عنوان دومین کلان‌شهر پرجمعیت ایران، در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی متوسط تا بالا واقع شده است. وجود گسل‌های فعال اطراف این شهر، وقوع زلزله‌ای مخرب را به یک تهدید جدی و همیشگی تبدیل کرده است (معروفی و همکاران، ۲۰۲۲). ازسوی‌دیگر بخش عمده‌ای از بافت مسکونی این شهر را آپارتمان‌های بلندمرتبه و متوسط تشکیل می‌دهند که سکونت‌گاه میلیون‌ها نفر هستند. رویکرد سنتی در مهندسی زلزله که تنها بر پیشگیری از فروریزی ساختمان و ایمنی جانی متمرکز است، برای چنین شهری کافی نیست. حتی اگر ساختمان‌ها فرو نریزند، خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌تواند به اختلال طولانی‌مدت در سکونت، تحمیل هزینه‌های گزاف بازسازی و فلج شدن عملکرد اجتماعی-اقتصادی شهر منجر شود (واکر و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، گذار از مفهوم مقاومت لرزه‌ای به تاب‌آوری لرزه‌ای به‌عنوان یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر در مدیریت ریسک این کلان‌شهر مطرح می‌شود.

تاب‌آوری لرزه‌ای طبق تعریف شاخص برونو (۲۰۰۳) به‌عنوان توانایی سیستم برای کاهش احتمال فروپاشی، جذب تأثیرات رویداد لرزه‌ای و بازیابی سریع و کارآمد به سطح عملکرد قابل‌قبول، در نظر گرفته می‌شود (برونو و همکاران، ۲۰۰۳). این توانایی بر چهار رکن اصلی افزایش استحکام و عملکرد[1]، وجود اجزای جایگزین و اضافه[2]، توانایی بسیج منابع[3] و سرعت بازیابی[4] استوار است (کاتر و همکاران، ۲۰۰۳).

برای اندازه‌گیری ابعاد مختلف تاب‌آوری، مجموعه‌ای از معیارهای کمی و کیفی تعریف می‌شود که با عنوان شاخص‌های تاب‌آوری شناسایی می‌شوند. به‌طورکلی شاخص‌های تاب‌آوری لرزه‌ای در قالب پنج بعد کالبدی-سازه‌ای، زیرساختی-شهری، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی-نهادی دسته‌بندی شده‌اند (سینها و همکاران، ۲۰۱۶).

مطالعات پیشین در حوزه تاب‌آوری لرزه‌ای عمدتاً بر روی شاخص‌های سازه‌ای و یا شاخص‌های کلان‌شهری متمرکز بوده‌اند (دودانوالا و همکاران، ۲۰۲۴) و نقش حیاتی معیارهایی مانند سرمایه اجتماعی، آمادگی ساکنین، کارایی مدیریت بحران و دسترسی به خدمات اضطراری را نادیده گرفته‌اند (چی یین و همکاران، ۲۰۲۲). براین‌اساس، فقدان یک چارچوب یکپارچه و چندمعیاره برای سنجش تاب‌آوری در مقیاس ساختمان‌های مسکونی متداول، با درنظرگیری هم‌زمان کلیه ابعاد غیرسازه‌ای، یک ضرورت پژوهشی است (کیم و همکاران، ۲۰۲۴؛ انور، ۲۰۲۰).

پژوهش حاضر، علاوه‌بر شناسایی، وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر بر تاب‌آوری در ابعاد پنجگانه فوق برای ارائه تصویری جامع و واقع‌بینانه از تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی، در پی بومی‌سازی این مفهوم در جغرافیای مشهد باتوجه‌به شرایط فرهنگی-اجتماعی آن است. همچنین استفاده از روش‌های ارزیابی چندمعیاره به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری عملی برای رتبه‌بندی ساختمان‌ها از نظر سطح تاب‌آوری که خروجی آن به‌صورت عینی و کمی در اختیار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران قرار گیرد، یکی دیگر از نوآوری‌ها و ارزش‌های اصیل این پژوهش است.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و رتبه‌بندی سطح تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی شهر مشهد براساس یک چارچوب چندمعیاره و جامع است. این پژوهش با در نظر گرفتن اهمیت فزاینده تاب‌آوری شهری در برابر زلزله، به دنبال ارائه تصویری دقیق از وضعیت موجود و شناسایی عوامل مؤثر بر آن است. در راستای تحقق این هدف، سه پرسش اساسی مورد بررسی قرار می‌گیرند:

نخست، «چه معیارها و شاخص‌های کلیدی بر تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی در شهر مشهد تأثیرگذار است؟»

دوم، «وزن و اهمیت نسبی هریک از این معیارها و شاخص‌ها در تاثیر بر تاب‌آوری کلی چگونه است؟»

سوم، «وضعیت موجود آپارتمان‌های نمونه موردمطالعه براساس شاخص‌های تاب‌آوری چگونه است؟»

براین‌اساس فرضیات پژوهشی مطرح‌شده در این مطالعه عبارت‌اند از: یکم، تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی در مشهد صرفاً به عامل ایمنی سازه‌ای محدود نشده و تحت تأثیر عوامل متعدد دیگری از جمله عوامل اجتماعی، اقتصادی و محیطی قرار دارد. دوم، بین سطح تاب‌آوری ساختمان و متغیرهایی نظیر تعداد طبقات، منطقه شهری، زیربنای واحد مسکونی، بعد خانوار و فاصله تا مراکز بحران، رابطه معناداری وجود دارد که بررسی این روابط می‌تواند درک بهتری از تاب‌آوری ایجاد کرده و ارائه راهکارهای مناسب‌تر را ممکن سازد.

نتایج حاصل از این پژوهش، ابزاری کارآمد در اختیار نهادهای مدیریت بحران قرار می‌دهد تا با شناسایی و اولویت‌بندی محله‌ها و ساختمان‌های آسیب‌پذیر، تخصیص بهینه بودجه‌های مقاوم‌سازی را تسهیل کنند. این نتایج می‌تواند به تدوین سند راهبردی برنامه‌ریزی شهری کمک کرده و با گنجاندن معیارهای تاب‌آوری در ضوابط ساخت‌وساز و طرح‌های تفصیلی، بستری برای توسعه شهری ایمن‌تر فراهم آورد. همچنین، امکان پیش‌بینی میزان خسارات، زمان موردنیاز برای واکنش و منابع لازم جهت بازسازی پس از زلزله که برای سازمان‌های امدادی حیاتی بوده را فراهم سازد. علاوه‌براین، نتایج تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی و اجرای کمپین‌های آموزشی به‌منظور افزایش آگاهی و ارتقای آمادگی شهروندان در برابر زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

1. Robustness
2. Redundancy
3. Resourcefulness
4. Rapidity

پس از این مقدمه، در بخش بعدی به مرور مبانی نظری و پیشینه پژوهش پرداخته می‌شود. پس از آن، روش تحقیق و شیوه‌های مورداستفاده برای گردآوری داده‌ها و تحلیل چندمعیاره تشریح می‌گردد. بخش یافته‌ها به ارائه و تحلیل نتایج اختصاص دارد و در پایان، بحث و نتیجه‌گیری نهایی ارائه خواهد شد.

ادبیات تحقیق

مبانی نظری

امروزه رویکرد مدیریت ریسک سوانح طبیعی از تمرکز صرف بر کاهش آسیب‌پذیری[5] به سمت ارتقای تاب‌آوری[6] تغییر یافته است (آدجر و همکاران، ۲۰۰۵). تاب‌آوری به‌عنوان پارادایمی جامع‌نگر، نه‌تنها بر مقاومت سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله، بلکه بر توانایی سیستم برای جذب شوک، سازگاری و بازگشت سریع به سطح عملکردی قابل‌قبول تأکید دارد (پراگ، ۲۰۱۴). تاب‌آوری در علوم مختلف تعاریف متنوعی دارد، اما در هسته مشترک تمامی این تعاریف، مفهوم توانایی یک سیستم در مقابله با اختلالات، حفظ عملکرد اصلی خود و بازیابی سریع و کارآمد، نهفته است (آلبرتی، ۲۰۰۵).

براین‌اساس تاب‌آوری لرزه‌ای به‌صورت خاص‌تر، ظرفیت سیستم‌های اجتماعی، اقتصادی، کالبدی و مدیریتی یک جامعه برای پیش‌بینی، تحمل و کاهش تأثیرات یک رویداد زلزله و نیز توانایی آن برای بازیابی، بازسازی و بازگشت به شرایط عادی یا حتی بهتر از گذشته در کوتاه‌ترین زمان ممکن، با کم‌ترین هزینه و آسیب‌های اجتماعی است (کارهلم و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات نشان می‌دهند تاب‌آوری پدیده‌ای چندبعدی است. یکی از معتبرترین چارچوب‌های نظری که بر ابعاد مختلف تاب‌آوری تأکید دارد، مدل برونو است. این چارچوب که روش‌شناسی این پژوهش را هدایت می‌کند، ابعاد اصلی زیر را شناسایی می‌کند (برونو و همکاران، ۲۰۰۳):

تاب‌آوری کالبدی[7]

به توانایی سیستم‌های فیزیکی و زیرساخت‌ها در مقاومت در برابر زلزله و حفظ عملکرد خود اشاره دارد (بون و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص‌های آن شامل کیفیت مصالح، رعایت اصول آیین‌نامه‌ای، شکل‌پذیری سازه و غیره است.

تاب‌آوری اقتصادی[8]

به توانایی سیستم اقتصادی جامعه در تحمل زیان‌های ناشی از زلزله و بازگشت سریع به فعالیت‌های اقتصادی عادی مربوط می‌شود (میشل و همکاران، ۲۰۱۴). شاخص‌هایی چون داشتن بیمه، تنوع شغلی و درآمدی ساکنان از مصادیق آن است.

تاب‌آوری اجتماعی[9]

به سرمایه اجتماعی، حس تعلق مکانی، آگاهی عمومی و توانایی جامعه محلی برای همکاری و کمک‌متقابل در دوران بحران و بازسازی اشاره دارد (آدجر، ۲۰۰۰). شاخص‌هایی مانند انسجام اجتماعی، سطح تحصیلات، و آگاهی از خطرپذیری زلزله در این بعد سنجیده می‌شوند.

تاب‌آوری سازمانی-مدیریتی[10]

به ظرفیت سازمان‌ها و نهادهای مسئول برای برنامه‌ریزی، هماهنگی و مدیریت پاسخ‌گویی مؤثر در شرایط بحرانی می‌پردازد (کلین و همکاران، ۲۰۰۳). شاخص‌هایی مانند سرعت امدادرسانی، وجود طرح‌های تخلیه و اسکان موقت در این بعد جای می‌گیرند.

این ابعاد در کنار هم، چارچوب کلی برای سنجش جامع تاب‌آوری را تشکیل می‌دهند. البته باتوجه‌به گستردگی حوزه کالبدی، براساس هدف تحقیق، می‌توان آن را در دو بخش کالبدی، مرتبط با ساختمان‌ها و زیر ساختی مرتبط با تأسیسات شهری بررسی نمود.

با شناسایی دقیق ابعاد و حوزه‌هایی که تحت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم خطر زلزله قرار دارند، امکان تعریف و اندازه‌گیری شاخص‌های کمی و کیفی برای سنجش میزان آسیب‌پذیری در هریک از این حوزه‌ها فراهم می‌گردد. این شاخص‌ها می‌توانند ابعاد مختلف آسیب‌پذیری، ازجمله آسیب‌پذیری فیزیکی ساختمان‌ها، آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی، آسیب‌پذیری اقتصادی و آسیب‌پذیری اجتماعی را مورد ارزیابی قرار دهند. تحلیل یکپارچه و سیستماتیک این شاخص‌ها، همراه با تعیین وزن و اهمیت نسبی هر شاخص براساس شرایط محلی و ویژگی‌های جمعیتی، فرآیند شناسایی عوامل اصلی در افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای را عملیاتی می‌سازد. این رویکرد یکپارچه، با ارائه دیدگاهی جامع از عوامل کلیدی مؤثر بر تاب‌آوری، امکان تدوین و اجرای برنامه‌های مؤثر و هدفمند برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش آمادگی در برابر زلزله را میسر می‌سازد و درنهایت به کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از این بلای طبیعی منجر خواهد شد. تصویر شماره ۱، نمایانگر مدل مفهومی این فرآیند جامع و یکپارچه است که در آن روابط بین شاخص‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر تاب‌آوری نمایش داده شده است.

5. Vulnerability Reduction
6. Resilience Enhancement
7. Technical Resilience
8. Economic Resilience
9. Social Resilience
10. Organizational Resilience

جدول ۱. پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه تاب‌آوری لرزه‌ای

زمینه کلی	نویسنده/ سال/ منبع	موضوع تحقیق	روش/مدل	یافته‌های کلیدی	شکاف و محدودیت‌های تحقیق	نتایج کلی
مرور مفاهیم	شریفی و همکاران، ۲۰۱۶	مروری بر اصول و شاخص‌های تاب‌آوری شهری	مرور سیستماتیک ادبیات و تحلیل محتوا	شاخص‌های تاب‌آوری را می‌توان در چهار دسته اجتماعی، اقتصادی، نهادی و کالبدی دسته‌بندی کرد.	این تحقیق یک مرور ادبیات است و خود یک روش عملیاتی برای ارزیابی ارائه نمی‌دهد.	ارائه یک دسته‌بندی جامع و قابل‌استناد از شاخص‌های کلیدی تاب‌آوری برای استفاده در مطالعات بعدی.
	اصلانی و همکاران، ۲۰۱۸	مروری بر مفاهیم، شاخص‌ها، چارچوب‌ها و مدل‌های تاب‌آوری در برابر زلزله	مرور متون تخصصی و اسناد مکتوب در حوزه موضوع	تاب‌آوری در ذات خود، دارای بعد اجتماعی است.	دیدگاه‌های تک بعدی در این حوزه، دیگر کارگشا نخواهد بود.	برای پژوهش در این حوزه، به‌کارگیری رویکرد ترکیبی، اجتناب ناپذیر است.
توسعه مفهوم	کیملارو و همکاران، ۲۰۱۰	ارائه چارچوبی مفهومی برای سنجش تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم‌های شهری	ارائه مدل PEOPLES (چهارچوبی براساس ۷ بعد عملکردی)	تاب‌آوری یک مفهوم چندبعدی است و نمی‌توان آن را تنها با یک شاخص مهندسی سنجید.	مدل مفهومی است و به توسعه روش‌های کمی‌سازی برای هر بعد نیاز دارد. عدم وجود داده‌های کافی برای عملیاتی کردن مدل.	ارائه یک چارچوب جامع برای تعریف و اندازه‌گیری تاب‌آوری در سطح جامعه.
	برونو و همکاران، ۲۰۰۳	توسعه مفهوم تاب‌آوری لرزه‌ای در جامعه	مطالعه نظری و ارائه چارچوب R=f(TCRE) (شکنندگی، سرعت بازیابی)	تاب‌آوری را می‌توان با کاهش سطح ریسک (شکنندگی) و کاهش زمان بازیابی پس از زلزله افزایش داد.	این چارچوب کیفی است و فاقد روش‌های کمی برای محاسبه شاخص‌های عددی می‌باشد.	پایه‌گذاری مفهوم مدرن تاب‌آوری لرزه‌ای و معرفی آن به‌عنوان یک ویژگی سیستمی.
	بوچینی و همکاران، ۲۰۱۴	چارچوبی تحلیلی برای برنامه‌ریزی بازیابی و تاب‌آوری جامعه پس از زلزله	بهینه‌سازی چندهدفه و مدل‌سازی عامل–بنیان	ارائه یک مدل یکپارچه برای بهینه‌سازی تخصیص منابع محدود در فرآیند بازیابی پس از سانحه.	مدل بسیار پیچیده است و اجرای آن در مقیاس بزرگ یک شهر به داده‌ها و قدرت پردازشی بسیار بالا نیاز دارد.	پیوند زدن مهندسی سازه، برنامه‌ریزی شهری و اقتصاد برای حداکثر کردن کارایی فرآیند بازیابی.
روش‌های ارزیابی	پیتیلاکیس و همکاران، ۲۰۱۴	ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه‌های زیرساختی شهری	روش چندمعیاره AHP فازی	ترکیب AHP با منطق فازی، ابزار قدرتمندی برای مدیریت عدم قطعیت در ارزیابی شاخص‌های کیفی تاب‌آوری است.	تمرکز تحقیق تنها بر روی زیرساخت‌ها بوده و ساختمان‌ها را به‌صورت مجزا در نظر نمی‌گیرد.	ارائه یک روش سیستماتیک برای اولویت‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری با در نظر گیری ابهام.
	رافت و همکاران، ۲۰۱۵	توسعه شاخص‌های کمی برای سنجش تاب‌آوری جامعه (BRIC)	توسعه شاخص ترکیبی (Composite Index) با وزن‌دهی بر اساس نظر خبرگان	شاخص پیشنهادی (BRIC) قادر به مقایسه تاب‌آوری جوامع مختلف در برابر بلایای طبیعی است.	داده‌های مورد نیاز برای محاسبه شاخص در سطح محلات شهری اغلب در دسترس نیست یا ناقص است.	ارائه یک شاخص عددی واحد که می‌تواند برای رتبه‌بندی و نظارت بر تاب‌آوری استفاده شود.
	برتون و همکاران، ۲۰۱۵	توسعه چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری ساختمان‌ها	مدل‌سازی شبیه‌سازی عملکردی (FEMA P–۵۸) و محاسبه زمان بازیابی	ارائه یک روش کمی برای محاسبه زمان موردنیاز برای بازگشت یک ساختمان به سطح عملکردی قابل‌قبول پس از زلزله.	روش نیازمند داده‌های بسیار دقیق و ویژه هر ساختمان است و محاسبات آن پیچیده و زمان‌بر می‌باشد.	امکان مقایسه کمی تاب‌آوری ساختمان‌های مختلف براساس معیار «زمان بازیابی» فراهم شد.
مطالعه موردی	اصلانی و همکاران، ۲۰۱۹	ارزیابی تاب‌آوری کالبدی شهر کرج در برابر زلزله	پرسش‌نامه و روش AHP برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌ها	مهم‌ترین مؤلفه تاب‌آوری «زیرساخت‌ها» و پس از آن «ساختمان‌ها» بود. مؤلفه‌های «بافت و ساختار شهری»، «کاربری‌ها» و «عوامل طبیعی» در مراتب بعدی قرار داشتند.	فقدان داده حدود ۱۰ درصد از شاخص‌ها مانند «پایداری معیشت و کسب‌وکار پس از زلزله» و «تغییرپذیری و انعطاف‌پذیری کاربری‌ها»	شناسایی و تحلیل پهنه‌های آسیب‌پذیر شهر کرج، استخراج شاخص‌ها براساس چارچوب مفهومی و اولویت‌بندی و وزن‌دهی آن‌ها
	د ریسی و همکاران، ۲۰۱۸	ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه بتنی	شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل عدم قطعیت	عدم قطعیت در پارامترهای زلزله تأثیر بسیار بیشتری بر روی تغییرپذیری نتایج تاب‌آوری دارد تا عدم قطعیت در مدل‌سازی ساختمان.	تحقیق بر یک تیپ خاص ساختمانی متمرکز است و تعمیم‌پذیری آن نیاز به بررسی انواع دیگر سازه‌ها دارد.	لزوم در نظر گیری عدم قطعیت ذاتی در خطر زلزله برای هرگونه ارزیابی واقع‌بینانه از تاب‌آوری.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های اولیه بیشتر بر روی تاب‌آوری کالبدی و ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها متمرکز بودند. به‌تدریج و با توسعه چارچوب‌هایی مانند مدل برونو (برونو و همکاران، ۲۰۰۳) و مدل تاب‌آوری جامعه کاتر (کاتر و همکاران، ۲۰۰۳)، مطالعات به سمت نگاه همه‌جانبه‌گرا و کمی‌سازی ابعاد مختلف حرکت کردند. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[11] برای سنجش شاخص‌های مختلف و وزن‌دهی به آن‌ها، شیوه‌ای عملیاتی جهت شناسایی و درک بهتر تاب‌آوری می‌تواند باشد.

در ایران، اگرچه مطالعات زیادی بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرها و بافت‌های فرسوده انجام شده، اما مفهوم تاب‌آوری به‌ویژه با نگاه چندبعدی، موضوعی نسبتاً نوین است. اغلب تحقیقات موجود بر یک بعد خاص و عمدتاً بر ویژگی‌های کالبدی تمرکز داشته‌اند. همچنین عمده تحقیقات در مقیاس کلان‌شهری، علی‌رغم سهم کاربری مسکونی با متوسط حدود ۵۰ درصد از سطح کاربری‌های شهری که مهم‌ترین و حساس‌ترین عرصه در هر شهر می‌باشد، بدون توجه به ویژگی‌های خاص انواع مختلف بافت‌های مسکونی (قدیم و جدید، آپارتمانی و ویلایی) شرایط فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی و غیره، حاکم بر آن‌ها انجام شده‌اند (امان‌پور و همکاران، ۲۰۱۶). در جدول شماره ۱ به برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های مسکونی اشاره می‌شود.

بررسی ادبیات موضوع، شکاف‌های پژوهشی متعددی را آشکار می‌سازد که این مطالعه در تلاش برای پاسخ به آن‌ها است؛ نخست، کمبود مدل‌های یکپارچه برای ارزیابی تاب‌آوری در مقیاس خرد (سطح ساختمان) به‌وضوح احساس می‌شود، زیرا اغلب مدل‌های موجود در مقیاس‌های کلان‌شهری یا منطقه‌ای عمل کرده و امکان ارزیابی و تطبیق واحدهای مسکونی منفرد را فراهم نمی‌سازند. دوم، مطالعات جامعی که به‌طور هم‌زمان به ابعاد گوناگون تاب‌آوری در محیط مسکونی آپارتمان‌ها بپردازند، به‌ویژه در بافت شهری ایران، بسیار محدود هستند و این ابعاد اغلب به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سوم، فقدان مطالعات تطبیقی بین بافت‌های مسکونی مختلف یک شهر، مانع از درک تفاوت‌ها و نقاط قوت و ضعف هر بافت در مواجهه با زلزله می‌شود؛ به‌عنوان‌مثال، مقایسه سیستماتیک و با روشی یکسان، تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌های محلات قدیمی با ساختمان‌های بافت میانی و جدید در یک شهر مانند مشهد، انجام نشده است. چهارم، لزوم بومی‌سازی و وزن‌دهی به شاخص‌های تاب‌آوری از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا بسیاری از شاخص‌های موجود در مدل‌های جهانی، با شرایط فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی ایران همخوانی ندارند؛ بنابراین، شناسایی و وزن‌دهی به شاخص‌های بومی‌شده که بازتاب‌دهنده واقعیات جامعه ایران باشند، یک ضرورت و شکاف پژوهشی اساسی محسوب می‌شود که این مطالعه به دنبال رفع آن است.

استفاده از رویکرد تحلیل چندمعیاره در ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی مشهد، ضرورتی نوآورانه و چندوجهی است که فراتر از محدودیت‌های مطالعات سنتی حرکت می‌کند. این مطالعات، غالباً با تمرکز صرف بر جنبه‌های کالبدی، از درک جامع و یکپارچه از آپارتمان به‌عنوان یک سیستم اجتماعی-کالبدی پویا باز می‌مانند. رویکرد چندمعیاره، با گنجاندن شاخص‌های متنوعی از ابعاد مختلف تاب‌آوری در شهر مشهد، امکان ارزیابی جامع‌تری را فراهم می‌آورد. این رویکرد، مقایسه تطبیقی بین بافت‌های مسکونی گوناگون شهر مشهد را میسر می‌سازد. با اعمال وزن‌دهی مناسب به هر شاخص، می‌توان میزان تاب‌آوری ساختمان‌ها در هر منطقه را به‌طور مجزا اندازه‌گیری و با سایر مجموعه‌ها مقایسه نمود؛ به‌عنوان‌مثال، یک ساختمان نوساز ممکن است از نظر کالبدی در وضعیت مطلوبی قرار داشته باشد، اما به‌دلیل ضعف انسجام اجتماعی بین ساکنان، در بعد اجتماعی عملکرد ضعیفی داشته باشد. این نوع تحلیل مقایسه‌ای، اطلاعات ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع مدیریت بحران در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. علاوه‌براین، روش‌های چندمعیاره با تعیین وزن و اهمیت هر شاخص، به شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر تاب‌آوری در هر منطقه کمک می‌کند. این امر، مدیران شهری را قادر می‌سازد تا به‌جای اجرای برنامه‌های کلی و پرهزینه، بر تقویت شاخص‌های کلیدی متناسب با ویژگی‌های هر منطقه تمرکز کنند؛ به‌عنوان‌مثال، در یک منطقه با اولویت دادن به آموزش‌های اجتماعی و در منطقه‌ای دیگر با تمرکز بر نوسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها، به بهبود تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی بپردازند.

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد، مرکز استان خراسان‌رضوی، با جمعیتی بیش از ۳.۵ میلیون نفر طبق سرشماری ۱۴۰۵، دومین کلان‌شهر پرجمعیت ایران است. این شهر در دشتی میان مختصات ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه طول جغرافیایی شرقی و ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته و وسعت آن به بیش از ۴۰۰ کیلومتر مربع می‌رسد (پیروی و همکاران، ۲۰۲۰). ساختار شهری مشهد بسیار ناهمگن است. این کلان‌شهر ترکیبی از بافت‌های تاریخی فرسوده، مناطق میانی با تراکم متوسط و مناطق نوساز با تراکم بسیار بالا است. تنوع بسیار زیاد در وضعیت اقتصادی-اجتماعی ساکنان، کیفیت ساخت‌وساز، و عمر بناها، آن را به یک نمونه ایدئال برای مطالعه تاب‌آوری تبدیل می‌کند.

11. Multiple-criteria decision analysis (MCDM)

ازسویی‌دیگر مشهد در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بالا قرار دارد. مشهد در گذشته شاهد زمین‌لرزه‌های مخرب بوده است. مهم‌ترین آن‌ها زلزله سال ۱۰۸۴ ه.ق (۱۶۷۳ م.) با بزرگای حدود ۶/۵ ریشتر است که به تخریب گسترده شهر و کشته‌شدن هزاران نفر منجر گردید (مقدس و همکاران، ۲۰۱۸). زلزله‌های تاریخی و ثبت‌شده دیگر در اطراف مشهد نیز گواه فعال بودن پهنه گسلی منطقه است. مهم‌ترین منبع تهدید لرزه‌ای شهر، گسل مشهد است (شاد و همکاران، ۱۳۹۹). این گسل با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق و طول حدود ۱۵۰ کیلومتر، از مرکز و جنوب شهر عبور می‌کند. مطالعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد این گسل فعال بوده و توانایی ایجاد زلزله‌ای با بزرگای حدود ۷ ریشتر را دارا است (حیاتی و همکاران، ۱۳۹۴).

برای پوشش دادن این تنوع، انتخاب نمونه‌ها باید به‌صورت هدفمند و خوشه‌ای از محلات با ویژگی‌های متمایز انجام شود. براین‌اساس نمونه‌ها از دو گروه محلات بافت فرسوده مرکزی و مناطق میانی و نوساز انتخاب شد. محلات مرکزی شهر، عمدتاً دارای بافت ریزدانه، معابر باریک، تراکم جمعیت بالا، ساختمان‌های فرسوده، وضعیت اقتصادی-اجتماعی به نسبت پایین‌تر هستند و فقدان فضاهای باز بشدت محسوس است. این محلات نماینده مناطق دارای بالاترین آسیب‌پذیری ذاتی هستند. در مقابل مناطق میانی ترکیبی از آپارتمان‌های نوساز، معابر عریض‌تر، دسترسی بهتر به خدمات و فضای سبز و ساکنین با وضعیت اقتصادی-اجتماعی متوسط به بالا می‌باشند. این مناطق نماینده بافت‌های نیمه‌منظم و برنامه‌ریزی‌شده با سطوح متوسط تاب‌آوری هستند.

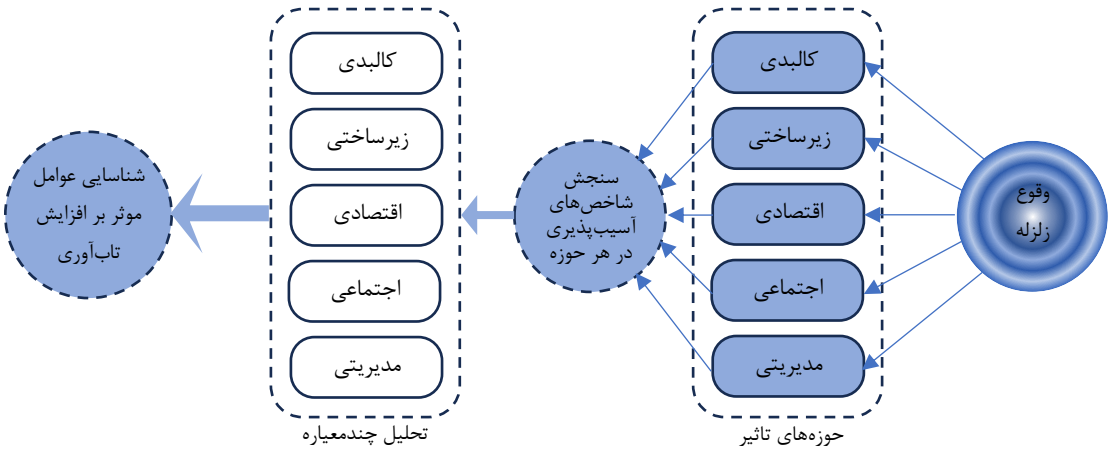
انتخاب نمونه‌ها با رویکردی علمی و چندمعیاره، با هدف تحقق سنجش عملیاتی تاب‌آوری لرزه‌ای صورت پذیرفت. این فرآیند با در نظر گرفتن معیارهای کالبدی، زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی انجام شد. روش نمونه‌گیری مورداستفاده، ترکیبی از روش‌های خوشه‌ای، تصادفی و طبقه‌بندی‌شده بود. بدین ترتیب، در گام نخست، شهر به مناطقی همگن براساس معیارهای مذکور تقسیم‌بندی شد. این طبقه‌بندی به شناسایی دو نوع بافت اصلی (بافت فرسوده، بافت میانی-جدید) منجر گردید. سپس از هریک، تعدادی محله به‌عنوان خوشه نمونه انتخاب شد. درنهایت، در داخل هر خوشه، ساختمان‌ها به‌صورت تصادفی برای ارزیابی دقیق‌تر انتخاب گردیدند. این روش نمونه‌گیری ترکیبی، امکان پوشش مناسب و نمایندگی کافی از تنوع بافت‌های شهری را فراهم آورده و اعتبار و قابلیت تعمیم نتایج سنجش تاب‌آوری را افزایش می‌دهد. اطلاعات کلی مناطقی که نمونه‌های منتخب در آن‌ها استقرار داشته‌اند، در جدول شماره ۲ و موقعیت نمونه‌ها در شهر در تصویر شماره ۲ نمایش داده شده است.

روش

شاخص‌ها و متغیرها

مفهوم چندوجهی تاب‌آوری در صورت مخاطرات لرزه‌ای تنها با انتخاب مجموعه‌ای مناسب از متغیرهای تأثیرگذار قابل‌توصیف است. در این مورد پنج دسته از شاخص‌ها شامل ویژگی‌های کالبدی، ویژگی‌های زیرساختی، ویژگی‌های اقتصادی، ویژگی‌های اجتماعی و ویژگی‌های مدیریتی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش‌های آماری، متغیرهای مؤثر بر تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه به دست آمد.

اولین گام از رویکرد روش‌شناختی، شناسایی و یکپارچه‌سازی داده‌ها با هدف ایجاد یک پلتفرم جامع جهت بررسی بود (جدول شماره ۳). تاب‌آوری لرزه‌ای از بعد کالبدی شامل ویژگی‌های سازه‌ای بناها می‌شود و از بعد زیرساختی، به امکانات و قابلیت‌های پیش‌بینی‌شده در شرایط خطر همچون، آرایش فضایی و کیفیت زیرساخت‌های حمل‌ونقل برای دسترسی مناسب به بیمارستان‌ها و ایستگاه‌های مدیریت اورژانس



تصویر ۱. مدل مفهومی پژوهش



تصویر ۲. موقعیت ساختمان‌های نمونه در شهر مشهد (نگارندگان)

وابسته است. علاوه‌براین تاب‌آوری لرزه‌ای از بعد اقتصادی با امکان مقابله و بازیابی پس از بحران و ارزش دارایی‌هایی که در صورت وقوع خطر در معرض آسیب هستند، در ارتباط است. از بعد اجتماعی نیز تاب‌آوری لرزه‌ای شامل تعداد کل و درصد جمعیت حساس در معرض خطر است و از بعد مدیریتی به قابلیت ارائه خدمات اضطراری، کاهش آسیب‌ها و جلوگیری از گسترش شرایط خطر وابسته است.

گردآوری داده‌ها

متغیرهای نهایی شامل ۶ متغیر کالبدی، ۷ متغیر زیرساختی، ۴ متغیر اقتصادی، ۶ متغیر اجتماعی و ۴ متغیر مدیریتی است که گردآوری داده‌های هر کدام با روش‌های مشاهده و بررسی میدانی، استناد به پایگاه داده‌های شهرداری و اسناد دولتی، مصاحبه‌های چهره‌به‌چهره با استفاده از یک پرسش‌نامه ساختاریافته و همچنین نظرسنجی از کارشناسان انجام شده است. روش گردآوری و منبع استخراج هر متغیر در جدول شماره ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۲. اطلاعات مناطق ساختمان‌های نمونه*

نمونه	نام محله	منطقه شهری	مساحت (هکتار)	درصد اشغال (از کل شهر)	درصد پوشش فضای سبز	سرانه فضای سبز	جمعیت	درصد جمعیت (از کل شهر)	تراکم (نفر در هکتار)	نسبت مرد به زن	بعد خانوار	نرخ باسوادی	رده جمعیت غالب
۱	هفت تیر	۹	۲۳۱/۱۹	۰/۶۷	۲/۱۶	۱/۰۳	۳۱۰۲۱	۱/۰۱	۱۳۴/۱۸	۹۵/۶۸	۲/۹۶	۹۷/۶۱	۲۵ –۳۹
۲	فرهنگ	۱۱	۲۰۶/۷۷	۰/۶	۳/۳۴	۱/۵۲	۳۳۰۴۸	۱/۰۸	۱۵۹/۸۳	۹۵/۱۳	۳/۱۴	۹۷/۶۳	۲۵–۳۹
۳	قاسم آباد	۱۰	۲۴۹/۴۸	۰/۷۳	۷/۲	۳/۷۷	۴۲۳۹۲	۱/۳۸	۱۶۹/۹۲	۱۰۰/۴۴	۳/۲۵	۹۷,۲۵	۲۰–۳۴
۴	عامل	۲	۵۵/۶۴	۰/۱۶	۰	۰	۱۰۳۰۳	۰/۳۴	۱۸۵/۱۶	۹۶/۷	۳/۰۵	۹۱/۷۷	۳۰–۳۴
۵	گاز	۲	۷۰/۳۱	۰/۲	۰	۰	۱۵۱۸۷	۰/۵	۲۱۶	۹۷/۸۵	۳/۱۶	۹۱/۵۸	۲۵–۳۴
۶	امامت	۱۱	۱۸۲/۲۸	۰/۵۳	۰/۶۵	۰/۲۵	۲۸۷۷۷	۰/۹۴	۱۵۷/۸۷	۹۷/۵۲	۳/۱۲	۹۶/۹۷	۲۵–۳۹
۷	هاشمیه	۹	۱۰۶/۶۷	۰/۳۱	۱/۶۷۸	۰/۸۱	۱۶۱۲۶	۰/۵۳	۱۵۱/۱۸	۹۷/۳۳	۳/۰۷	۹۸/۰۲	۲۵–۳۹
۸	مطهری	۲	۱۶۵/۲	۰/۴۸	۰/۹۹۰۷	۰/۳۸	۴۲۵۱۰	۰/۱۴	۲۵۷/۳۳	۱۰۰	۳/۱۵	۹۲/۰۶	۳۰–۳۴
۹	عبادی	۲	۵۱/۷۳	۰/۱۵	۸/۱۴	۲/۴۷	۱۳۰۱۳	۰/۰۰۴	۲۵۱/۵۸	۱۰۱/۸۸	۳/۰۱	۹۲/۵۸	۲۵–۳۴
۱۰	خواجه ربیع	۲	۱۱۶/۰۸	۰/۳۴	۴/۹	۱/۴۹	۲۶۲۳۱	۰/۸۶	۲۹۲/۰۵	۱۰۲/۴۸	۳/۲۹	۸۷/۷	۲۵–۳۴

* داده‌های جدول از اطلس محلات شهر مشهد (پیروی و همکاران، ۲۰۲۰) برگرفته شده است.

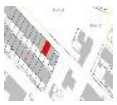
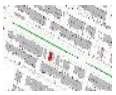
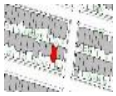
جدول ۳. شاخص‌ها و متغیرهای مؤثر بر تاب‌آوری لرزه‌ای

شاخص	متغیر	توضیحات	منبع
کالبدی	نوع سازه	نوع سیستم سازه‌ای بکار رفته در ساختمان	مارتینز و همکاران، ۲۰۱۲
	کیفیت سازه	قابلیت بهره‌برداری از ساختمان در شرایط بحران	سینها و همکاران، ۲۰۱۶
	سیستم مهار جانبی	نوع سیستم مهار جانبی	مارتینز و همکاران، ۲۰۱۲
	قدمت سازه	مدت زمان احداث ساختمان	سینها و همکاران، ۲۰۱۶
	ابعاد سازه	طول، عرض و ارتفاع ساختمان	آرماس و همکاران، ۲۰۱۵
	فواصل سازه‌ای	فاصله تا ساختمان مجاور و روبرو	اویست و همکاران، ۲۰۱۲
زیرساختی	درصد کاربری مسکونی	میزان کاربری مسکونی به نسبت سایر کاربری‌ها در محدوده اطراف ساختمان	کارنو و همکاران، ۲۰۰۷
	دسترسی به شبکه حمل و نقل و معابر اصلی	فاصله ساختمان از معابر اصلی و شبکه حمل و نقل شهری	المایسی و همکاران، ۲۰۲۲
	کیفیت معبر مجاور در شرایط خطر	میزان امنیت معابر مجاور ساختمان در شرایط بحرانی	کیلانیتیس و همکاران، ۲۰۱۹
	دسترسی به فضای باز و ایمن	فاصله ساختمان تا نزدیک‌ترین فضای باز یا ایمن	آرماس و همکاران، ۲۰۱۵
	دسترسی به کاربری‌های امدادی (درمانی، آتش‌نشانی، پلیس)	متوسط فاصله ساختمان تا مراکز امدادی سه گانه	نیازی و همکاران، ۲۰۲۱
	فاصله از محدوده‌ها، اماکن و کاربری‌های پرخطر	متوسط فاصله ساختمان تا اماکن یا کاربری‌های دارای پتانسیل خطر	آرماس و همکاران، ۲۰۱۵
	دسترسی به خدمات شهری (آب، برق، گاز، تلفن، اینترنت و ...)	امکان دسترسی به خدمات شهری در شرایط بحرانی	علامی و همکاران، ۲۰۲۴
اقتصادی	وضعیت اشتغال – درآمد	میزان تأمین اقتصادی ساکنان در شرایط بحران	سوتلی و همکاران، ۲۰۱۷
	متوسط قیمت مسکن	ارزش مالی واحد سطح مسکن (به عنوان مقیاس توان مالی ساکنان در شهر)	تاسمن و همکاران، ۲۰۲۳
	کمیت مسکن	زیربنای واحد مسکونی (به عنوان مقیاس توان مالی ساکنان در منطقه)	سوتلی و همکاران، ۲۰۱۷
	کیفیت مسکن	قابلیت پاسخگویی مسکن به نیاز ساکنان	سینها و همکاران، ۲۰۱۶
اجتماعی	تراکم جمعیت در منطقه	متوسط تعداد افراد در مساحت منطقه	راشد و همکاران، ۲۰۰۳
	تعداد کل ساکنان	تعداد افراد ساکن در ساختمان	راشد و همکاران، ۲۰۰۳
	سطح سلامت بدنی – متوسط سن	متوسط سن افراد (به عنوان مقیاس سطح توانایی فیزیکی افراد)	هانگ و همکاران، ۲۰۲۴
	نسبت جنسی	نسبت جنسی زن به مرد بین ساکنان ساختمان	سوتلی و همکاران، ۲۰۱۷
	بعد خانوار	تعداد افراد ساکن در یک واحد مسکونی	هانگ و همکاران، ۲۰۲۴
	نرخ سواد	متوسط سطح علمی ساکنان	سوتلی و همکاران، ۲۰۱۷
مدیریتی	میزان آمادگی در صورت وقوع زمین‌لرزه	گستره پیش‌بینی مواجهه با بحران در سازمان مدیریت شهری	واکر و همکاران، ۲۰۱۴
	وجود مراکز چند منظوره و بحران	وجود مرکز بحران تا شعاع ۵۰۰۰ متر	برونو و همکاران، ۲۰۰۷
	تأمین امکانات و تجهیزات ضروری	وجود تجهیزات شهری جهت استفاده در شرایط بحران	برونو و همکاران، ۲۰۰۷
	وجود علائم و راهنمای مناسب جهت دسترسی	نصب علائم شهری جهت راهنمایی در شرایط بحران	ژائو و همکاران، ۲۰۲۳

جدول ۴. شیوه گردآوری داده‌ها

معیار	متغیر	نوع داده	روش اندازه‌گیری	منبع داده
کالبدی	نوع سازه	کمی	بررسی اسناد	گواهی پایانکار
	کیفیت سازه	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	ساختمان
	سیستم مهار جانبی	کمی	مشاهده و بررسی میدانی	ساختمان
	قدمت سازه	کمی	گواهی پایانکار	ساختمان
	ابعاد سازه	کمی	بررسی اسناد	سند و گواهی پایانکار
	فواصل سازه‌ای	کمی	مشاهده و بررسی میدانی	ساختمان
زیرساختی	درصد کاربری مسکونی	کمی	بررسی اسناد	پایگاه اطلاعات شهرداری
	دسترسی به شبکه حمل‌ونقل و معابر اصلی	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	کیفیت معبر مجاور در شرایط خطر	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	دسترسی به فضای باز و ایمن	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	دسترسی به کاربری‌های امدادی (درمانی، آتش‌نشانی، پلیس)	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	فاصله از محدوده‌ها، اماکن و کاربری‌های پرخطر	کمی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	دسترسی به خدمات شهری (آب، برق، گاز، تلفن، اینترنت و غیره)	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
اقتصادی	وضعیت اشتغال – درآمد	کمی	پرسش‌نامه	ساکنان
	متوسط قیمت مسکن	کمی	نظرسنجی	کارشناس
	کمیت مسکن	کمی	بررسی اسناد	گواهی پایانکار
	کیفیت مسکن	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	واحد مسکونی
اجتماعی	تراکم جمعیت در منطقه	کمی	بررسی اسناد	پایگاه اطلاعات شهرداری
	تعداد کل ساکنان	کمی	پرسش‌نامه	ساکنان
	سطح سلامت بدنی – متوسط سن	کیفی	پرسش‌نامه	ساکنان
	نسبت جنسی	کمی	پرسش‌نامه	ساکنان
	بعد خانوار	کمی	پرسش‌نامه	ساکنان
	نرخ سواد	کمی	پرسش‌نامه	ساکنان
مدیریتی	میزان آمادگی در صورت وقوع زمین‌لرزه	کیفی	بررسی اسناد	پایگاه اطلاعات شهرداری
	وجود مراکز چند منظوره و بحران	کمی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان
	امکانات و تجهیزات ضروری	کیفی	بررسی اسناد	پایگاه اطلاعات شهرداری
	علائم و راهنمای مناسب جهت دسترسی	کیفی	مشاهده و بررسی میدانی	محدوده ساختمان

جدول ۵. ساختمان‌های موردبررسی در شهر

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نمونه ۷	نمونه ۸	نمونه ۹	نمونه ۱۰
هاشمیه	حجاب	هفت تیر	فرهنگ	امامت	مطهری	عبادی	عامل	کامیاب	خواجه ربیع
									
									

متغیرهای کالبدی

در بخش اطلاعات کالبدی، فرآیند جمع‌آوری داده‌ها در دو مقیاس ساختمانی و پیرامونی صورت گرفت. به‌منظور دستیابی به داده‌های دقیق و قابل‌اتکا در سطح ساختمانی، مقادیر متغیرهای مرتبط با ویژگی‌های فیزیکی بناها، از طریق بررسی و تحلیل اسناد رسمی گواهی پایان‌کار ساختمان‌ها استخراج گردید. این رویکرد، امکان دسترسی به اطلاعات جامعی نظیر مساحت زیربنا، تعداد طبقات و سایر مشخصات فنی ساختمان‌ها را فراهم ساخت. درمقابل، به‌منظور ارزیابی و ثبت متغیرهای مرتبط با محیط پیرامون ساختمان، از روش‌های مشاهده مستقیم و بررسی‌های میدانی بهره گرفته شد. این شیوه گردآوری داده‌ها، امکان ثبت اطلاعاتی نظیر فواصل ساختمان‌ها و وضعیت و ویژگی‌های بلافصل ساختمان را میسر ساخت. بدین ترتیب، با اتخاذ این رویکرد دوگانه، مجموعه‌ای جامع و یکپارچه از داده‌های کالبدی در هر دو سطح ساختمانی و محیطی گردآوری گردید که مبنای تحلیل‌ها و ارزیابی‌های آتی را فراهم آورد.

متغیرهای زیرساختی

در بخش زیرساخت، فرآیند جمع‌آوری داده‌های متغیرها با اتکا به دو منبع اصلی صورت گرفت: نخست، اطلاعات موجود در پایگاه داده‌های جامع شهرداری و دوم، مشاهدات دقیق و بررسی‌های میدانی که در محدوده‌ای به شعاع ۱۰۰ متری پیرامون ساختمان موردمطالعه انجام شد. این رویکرد دوگانه با هدف حصول اطمینان از صحت و جامعیت اطلاعات به کار گرفته شد. بااین‌حال، در مواردی که بین داده‌های ثبت‌شده در پایگاه اطلاعات شهرداری و واقعیت‌های مشاهده‌شده در محل اختلافاتی وجود داشت، به‌ویژه درارتباط‌با وضعیت معابر، زیرساخت‌های شهری نظیر شبکه‌های آب و برق و گاز و همچنین امکانات مجاور ساختمان‌های نمونه، ملاک اصلی برای تحلیل و ارزیابی، شرایط و ویژگی‌های وضع موجود و یافته‌های حاصل از مشاهدات میدانی قرار گرفت. این تصمیم‌گیری با این استدلال صورت گرفت که اطلاعات وضع موجود، تصویری دقیق‌تر و به‌روزتر از شرایط زیرساختی منطقه ارائه می‌دهد و درنتیجه، مبنای معتبرتری برای تحلیل‌های بعدی و تدوین راهکارهای مبتنی بر واقعیت فراهم می‌آورد.

جدول ۶. مقیاس ترجیح بین دو پارامتر در AHP (ساتی، ۱۹۷۷).

توضیح		درجه ترجیحات	وزن
دو عامل اهمیت برابر دارند.	ترجیح یکسان	Equally Preferred	۱
یک عامل کمی بر دیگری ترجیح دارد.	کمی مرجح	Moderately Preferred	۳
یک عامل بر دیگری ترجیح دارد.	مرجح	Strongly Preferred	۵
یک عامل بسیار بر دیگری ترجیح دارد.	بسیار مرجح	Very Strongly Preferred	۷
یک عامل کاملاً بر دیگری ترجیح دارد.	کاملا مرجح	Extremely Preferred	۹
ترجیحات میان وزن‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹	ترجیحات میانی	Intermediate Preferred	۸ ،۶ ،۴ ،۲
یک عامل در تضاد با دیگری است.	ترجیحات متضاد	Opposite Preferred	مقادیر معکوس

جدول ۷. ماتریس همبستگی اسپیرمن

متغیرها	نوع سازه	کیفیت سازه	سیستم مهار جانبی	قدمت سازه	ابعاد سازه	فواصل سازه‌ای	درصد کاربری مسکونی	دسترسی به شبکه حمل و نقل	کیفیت معبر مجاور	دسترسی به فضای باز و ایمن	دسترسی به کاربری‌های امدادی	فاصله از محدوده‌های پرخطر	دسترسی به خدمات شهری	وضعیت اشتغال – درآمد
نوع سازه		۰/۹۴۱	۰/۹۴۴	۰/۶۹۳	۰/۲۴	۰/۵۸۷	-۰/۷۸۹	۰/۸۳۲	۰/۸۴۳	۰/۹۳۲	۰/۶۹۸	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۱۴۲
کیفیت سازه	۰/۹۴۱		۰/۸۷۰	۰/۶۷۵	۰/۴۹۴	۰/۴۳۸	-۰/۸۱۶	۰/۸۵۸	۰/۷۹۸	۰/۹۱۹	۰/۷۱۱	۰/۷۵۲	۰/۸۴۱	۰/۱۱۸
سیستم مهار جانبی	۰/۹۴۴	۰/۸۷۰		۰/۴۷۵	۰/۶۳۶	۰/۴۴۳	-۰/۶۵۰	۰/۸۱۶	۰/۸۸۱	۰/۸۵۳	۰/۴۳۲	۰/۵۲۴	۰/۵۸۰	-۰/۰۸۵
قدمت سازه	۰/۶۹۳	۰/۶۷۵	۰/۴۷۵		۰/۶۳۶	۰/۸۶۹	-۰/۶۵۸	۰/۵۴۲	۰/۴۲۹	۰/۴۳۹	۰/۸۸۸	۰/۷۹۰	۰/۶۹۴	-۰/۱۱۶
ابعاد سازه	۰/۲۴	۰/۴۹۴	۰/۶۳۶	۰/۶۳۶		۰/۷۸۲	-۰/۴۰۵	۰/۵۷۴	۰/۵۳۸	۰/۴۳۹	۰/۳۴۳	۰/۳۳۳	۰/۲۲۴	-۰/۱۸۸
فواصل سازه‌ای	۰/۵۸۷	۰/۴۳۸	۰/۴۴۳	۰/۸۶۹	۰/۷۸۲		-۰/۴۳۶	۰/۳۹۵	۰/۲۸۵	۰/۴۴۵	۰/۶۵۴	۰/۵۶۲	۰/۴۱۱	-۰/۱۱۸
درصد کاربری مسکونی	-۰/۷۸۹	-۰/۸۱۶	-۰/۶۵۰	-۰/۶۵۸	-۰/۴۰۵	-۰/۴۳۶		۰/۶۲۸	۰/۵۱۱	-۰/۸۹۵	-۰/۸۰۱	-۰/۹۰۹	-۰/۷۲۹	-۰/۱۲۶
دسترسی به شبکه حمل و نقل	۰/۸۳۲	۰/۸۵۸	۰/۸۱۶	۰/۵۴۲	۰/۵۷۴	۰/۳۹۵	۰/۶۲۸		۰/۹۴۷	۰/۶۸۰	۰/۴۵۴	۰/۴۶۵	۰/۷۹۴	۰/۲۳۰
کیفیت معبر مجاور	۰/۸۴۳	۰/۷۹۸	۰/۸۸۱	۰/۴۲۹	۰/۵۳۸	۰/۲۸۵	-۰/۵۱۱	۰/۹۴۷		۰/۶۶۲	۰/۳۳۹	۰/۲۷۱	۰/۶۸۹	۰/۷۰۲
دسترسی به فضای باز و ایمن	۰/۹۳۲	۰/۹۱۹	۰/۸۵۳	۰/۴۳۹	۰/۴۴۵	۰/۴۳۹	-۰/۸۹۵	-۰/۶۸۰	۰/۶۶۲		۰/۷۵۹	۰/۸۴۸	۰/۷۹۵	۰/۵۰۲
دسترسی به کاربری‌های امدادی	۰/۶۹۸	۰/۷۱۱	۰/۴۳۲	۰/۸۸۸	۰/۳۴۳	۰/۶۵۴	-۰/۸۰۱	-۰/۴۵۴	۰/۳۳۹	۰/۷۵۹		۰/۹۲۱	۰/۷۰۸	۰/۲۹۸
فاصله از محدوده‌های پرخطر	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۵۲۴	۰/۷۹۰	۰/۳۳۳	۰/۵۶۲	-۰/۹۰۹	-۰/۴۶۵	۰/۲۷۱	۰/۸۴۸	۰/۹۲۱		۰/۷۰۸	۰/۲۳۹
دسترسی به خدمات شهری	۰/۷۵۲	۰/۸۴۱	۰/۵۸۰	۰/۶۹۴	۰/۲۲۴	۰/۴۱۱	-۰/۷۲۹	-۰/۷۹۴	۰/۶۸۹	۰/۷۰۲	۰/۷۹۵	۰/۷۰۸		۰/۲۹۸
وضعیت اشتغال – درآمد	۰/۱۴۲	۰/۱۱۸	۰/۰۰۳	-۰/۱۱۶	-۰/۱۸۸	-۰/۰۸۵	-۰/۱۲۶	-۰/۲۳۰	-۰/۵۰۲	-۰/۲۹۸	-۰/۲۳۹	-۰/۲۳۹	-۰/۲۹۸	

متغیرها	متوسط قیمت مسکن	کمیت مسکن	کیفیت مسکن	تراکم جمعیت در منطقه	تعداد کل ساکنان	سطح سلامت	نسبت جنسی	بعد خانوار	نرخ سواد	میزان آمادگی	مرکز بحران	امکانات و تجهیزات	علائم و راهنما
نوع سازه	۰/۸۲۳	۰/۴۴۷	۰/۹۲۳	-۰/۷۴۴	۰/۰۹۰	۰/۴۸۳	-۰/۵۴۴	۰/۰۳۱	۰/۸۷۷	۰/۹۷۵	۰/۹۱۷	۰/۹۰۲	۰/۴۰۲
کیفیت سازه	۰/۸۷۸	۰/۵۶۸	۰/۹۲۸	-۰/۶۴۳	-۰/۰۶۳	۰/۴۲۲	-۰/۵۳۱	۰/۰۰۰	۰/۸۷۳	۰/۹۵۶	۰/۸۷۲	۰/۸۶۵	۰/۴۵۰
سیستم مهار جانبی	۰/۶۵۸	۰/۴۹۲	۰/۸۳۰	-۰/۵۲۶	۰/۰۷۶	۰/۴۲۵	-۰/۴۴۹	۰/۲۱۲	۰/۴۴۷	۰/۸۹۶	۰/۸۰۸	۰/۷۶۵	۰/۴۸
قدمت سازه	۰/۷۹۹	۰/۱۷۰	۰/۶۷۸	-۰/۷۶۶	۰/۲۵۲	۰/۳۰۲	-۰/۵۵۳	-۰/۴۹۲	۰/۷۹۹	۰/۷۲۶	۰/۷۶۷	۰/۷۹۹	-۰/۰۳۷
ابعاد سازه	۰/۴۹۴	۰/۲۰۰	۰/۴۸۹	-۰/۲۵۸	۰/۴۹۴	-۰/۱۱۶	-۰/۱۷۶	-۰/۰۹۱	۰/۵۰۵	۰/۶۲۰	۰/۵۸۷	۰/۵۹۰	-۰/۰۶۷
فواصل سازه‌ای	۰/۴۸۰	-۰/۰۱۸	۰/۴۸۳	-۰/۵۸۸	۰/۶۳۰	۰/۱۶۷	-۰/۴۰۶	-۰/۳۳۰	۰/۵۸۳	۰/۸۱۷	۰/۶۱۲	۰/۶۳۴	-۰/۱۹۰
درصد کاربری مسکونی	-۰/۷۹۸	-۰/۷۳۶	-۰/۹۵۰	۰/۶۹۹	-۰/۰۸۴	-۰/۱۵۸	۰/۲۲۷	۰/۰۷۴	-۰/۷۱۱	-۰/۸۱۷	-۰/۹۲۰	-۰/۹۴۰	-۰/۱۵۷۱
دسترسی به شبکه حمل و نقل	۰/۶۸۷	۰/۴۰۱	۰/۷۲۰	-۰/۲۵۱	-۰/۲۵۱	-۰/۲۲۲	-۰/۴۶۴	۰/۱۷۳	۰/۷۴۳	۰/۹۱۳	۰/۷۰۱	۰/۷۹۶	۰/۲۴۹
کیفیت معبر مجاور	۰/۵۹۶	۰/۳۰۰	۰/۶۶۴	-۰/۴۲۲	-۰/۱۵۸	۰/۴۲۵	-۰/۴۴۰	۰/۲۵۷	۰/۷۰۶	۰/۸۷۶	۰/۶۶۰	۰/۷۰۶	۰/۳۰۳
دسترسی به فضای باز و ایمن	۰/۸۶۴	۰/۶۲۲	۰/۹۸۲	-۰/۷۵۰	۰/۰۹۰	۰/۴۲۵	-۰/۴۸۲	۰/۰۲۴	۰/۸۵۰	۰/۸۹۲	۰/۹۵۷	۰/۸۹۶	۰/۵۸۰
دسترسی به کاربری‌های امدادی	۰/۸۸۶	۰/۳۱۲	۰/۸۸۰	-۰/۹۱۰	۰/۲۳۱	۰/۵۱۳	-۰/۶۰۵	-۰/۵۱۷	۰/۸۱۹	۰/۸۷۰	۰/۸۰۸	۰/۸۲۳	۰/۲۵۲
فاصله از محدوده‌های پرخطر	۰/۸۴۶	۰/۵۹۹	۰/۸۸۲	-۰/۷۷۲	۰/۳۰۷	۰/۵۸۵	-۰/۴۳۸	-۰/۳۲۱	۰/۷۵۲	۰/۸۷۵	۰/۸۹۴	۰/۸۷۶	۰/۳۷۵
دسترسی به خدمات شهری	۰/۸۶۷	۰/۴۶۲	۰/۴۷۵	-۰/۷۶۰	-۰/۱۹۰	۰/۵۲۵	-۰/۶۱۱	-۰/۶۹۵	۰/۸۲۵	۰/۸۳۳	۰/۶۹۸	۰/۸۱۳	۰/۳۴۱
وضعیت اشتغال - درآمد	۰/۴۵۵	-۰/۰۴۳	۰/۱۶۹	-۰/۷۲۰	-۰/۰۳۱	-۰/۰۵۲	-۰/۶۲۸	-۰/۷۰۸	-۰/۴۱۰	۰/۶۲۰	۰/۱۹۶	۰/۸۳۴	۰/۴۱۱
متوسط قیمت مسکن		۰/۴۳۱	۰/۸۵۱	-۰/۸۶۸	-۰/۰۳۱	۰/۳۱۵	-۰/۰۷۹	-۰/۳۹۸	۰/۹۶۹	۰/۸۷۵	۰/۹۶۳	۰/۸۵۷	۰/۸۱۶
کمیت مسکن			۰/۴۶۱	-۰/۲۱۲	-۰/۰۶۸	۰/۲۹۸	-۰/۳۹۸	-۰/۴۴۵	-۰/۱۰۳	-۰/۱۰۲	-۰/۱۵۷	-۰/۱۵۷	-۰/۱۲۴
کیفیت مسکن				-۰/۷۲۸	۰/۱۱۵	-۰/۲۵۹	۰/۱۱۱	-۰/۱۲۳	-۰/۰۶۱	-۰/۴۳۱	۰/۰۰۶	۰/۵۱۵		
تراکم جمعیت در منطقه					-۰/۱۷۲									
تعداد کل ساکنان														
سطح سلامت														
نسبت جنسی														
بعد خانوار														
نرخ سواد														
میزان آمادگی														
مرکز بحران														
امکانات و تجهیزات														
علائم و راهنما														

جدول ۸. میزان واریانس مؤلفه‌های اصلی استخراج شده (حاصل از روش PCA)

مؤلفه	مقدار ویژه	درصد واریانس مؤلفه	درصد تجمعی واریانس
۱	۹/۲۱	۳۴/۱۲	۳۴/۱۲
۲	۴/۸۷	۱۸/۰۴	۵۲/۱۶
۳	۳/۵۵	۱۳/۱۵	۶۵/۳۱
۴	۲/۴۱	۸/۹۳	۷۴/۲۴
۵	۲/۱۸	۸/۰۸	۸۲/۳۲

متغیرهای اقتصادی

در بخش اقتصادی این پژوهش، جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از روش‌های گوناگون صورت گرفت تا تصویری جامع و دقیق از وضعیت موجود ارائه شود. اطلاعات مربوط به متغیر اشتغال-درآمد، از طریق طراحی و توزیع پرسش‌نامه‌های استاندارد به دست آمد. داده‌های متوسط قیمت مسکن با بهره‌گیری از نظرسنجی از کارشناسان مجرب و فعال در بازار مسکن تعیین گردید. کمیت مسکن، براساس اطلاعات مربوط به گواهی پایان‌کار ساختمان جمع‌آوری گردید. درنهایت، کیفیت مسکن از طریق مشاهده و بررسی میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

متغیرهای اجتماعی

در بخش اجتماعی، مقدار متغیر تراکم جمعیت در منطقه از طریق پایگاه اطلاعات شهرداری و مقادیر سایر متغیرها از طریق پرسش‌نامه جمع‌آوری گردید. از پرسش‌نامه برای شناسایی ویژگی‌های اجتماعی ساکنان در ساختمان‌های موردمطالعه استفاده شد. بنابراین جامعه آماری، ساکنان ساختمان‌های موردمطالعه و روش نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند و غیرتصادفی انتخاب گردید. پاسخ دهندگان بین ۱۴ تا ۷۶ سال سن داشتند و همگی در ساختمان‌های موردبررسی سکونت داشتند. سؤالات برای تولید داده‌های کمی، به‌صورت بسته طراحی شده و پاسخ‌ها دارای گزینه‌های مشخص (مقیاس لیکرت) بوده و برای پایایی و سنجش ثبات درونی از روش آلفای کرونباخ استفاده شد.

در مجموع ۹۸ مصاحبه ساختاریافته با تمرکز بر ویژگی‌های اجتماعی از میان ساکنان انجام شد. جدول شماره ۳، ویژگی‌های موردپرسش (جنسیت، سن، وضعیت سلامتی، سطح سواد، شرایط اقتصادی و غیره) را نشان می‌دهد. در مورد جزئیات جامعه آماری در بخش انتخاب نمونه‌ها و شیوه تحلیل آماری در بخش تحلیل داده‌ها بیشتر توضیح داده شده است.

متغیرهای مدیریتی

در بخش مدیریتی، فرآیند جمع‌آوری داده‌های مرتبط با متغیرهای تحقیق به دو شیوه انجام شد. داده‌های مربوط به میزان آمادگی مدیریت شهری در مواجهه با زلزله، شامل امکانات و تجهیزات ضروری، از طریق استخراج اطلاعات از پایگاه داده‌های جامع شهرداری گردآوری شد. اطلاعات مرتبط با وجود مراکز چندمنظوره و همچنین وجود علائم و راهنمای مناسب جهت دسترسی آسان و سریع به این مراکز، از طریق مشاهده مستقیم و بررسی‌های میدانی دقیق جمع‌آوری شد. براساس هدف تحقیق، اطلاعات هریک از بخش‌های کالبدی، زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی، در مجموع از روش‌های زیر جمع‌آوری شده‌اند: ۱۲ متغیر از طریق مشاهده و بررسی میدانی، ۴ متغیر از پایگاه داده شهرداری، ۴ متغیر از اسناد دولتی، ۶ متغیر از پرسش‌نامه حضوری ساکنین و ۱ متغیر از طریق نظرسنجی از کارشناس (جدول شماره ۴).

پردازش داده‌ها

به‌منظور تبدیل داده‌های گردآوری‌شده به مجموعه‌ای قابل‌مدیریت و تسهیل بازنمایی، بررسی و تحلیل آن‌ها، فرایند پردازش داده‌ها با دقت و تمرکز انجام شد. در این راستا، نرم‌افزار اکسل (نسخه ۲۰۲۱) به‌عنوان ابزار اصلی مدیریت داده مورد استفاده قرار گرفت. بدین‌ترتیب که برای هر نمونه ساختمانی، یک پروفایل جامع و اختصاصی ایجاد گردید و کلیه داده‌های خام اولیه، شامل مقادیر مربوط به ۲۷ متغیر ازپیش‌تعیین‌شده، به‌طور کامل در آن ثبت و مستند گردید. این پروفایل‌های ساختارمند، منبع اطلاعاتی مناسبی را برای انجام تحلیل‌های دقیق و عمیق در مراحل بعدی تحقیق فراهم نمود.

جدول ۹. میزان بار عاملی هر متغیر در هر مؤلفه (حاصل از روش PCA)

متغیر	F1	F2	F3	F4	F5
نوع سازه	۰/۸۶۱				
کیفیت سازه	۰/۹۵۸				
سیستم مهار جانبی	۰/۸۲۳				
قدمت سازه	۰/۶۹۷				
ابعاد سازه	۰/۴۶۵				
فواصل سازه‌ای	۰/۶۷۸				
درصد کاربری مسکونی		-۰/۹۶۰			
دسترسی به شبکه حمل و نقل		۰/۸۰۵			
کیفیت معبر مجاور		۰/۷۳۱			
دسترسی به فضای باز و ایمن		۰/۸۶۹			
دسترسی به کاربری‌های امدادی		۰/۸۰۲			
فاصله از محدوده‌های پرخطر		۰/۸۷۸			
دسترسی به خدمات شهری		۰/۸۴۶			
وضعیت اشتغال – درآمد			۰/۳۶۶		
متوسط قیمت مسکن			۰/۸۹۷		
کمیت مسکن			۰/۶۷۲		
کیفیت مسکن			۰/۹۹۶		
تراکم جمعیت در منطقه				-۰/۷۴۹	
تعداد کل ساکنان				۰/۵۴۶	
سطح سلامت				۰/۵۴۱	
نسبت جنسی				-۰/۵۸۳	
بعد خانوار				-۰/۶۸۷	
نرخ سواد				۰/۹۱۹	
میزان آمادگی					۰/۷۵۲
مرکز بحران					۰/۸۶۲
امکانات و تجهیزات					۰/۹۷۷
علائم و راهنما					۰/۵۶۷

جدول ۱۰. وزن معیارها و زیرمعیارهای تاب‌آوری لرزه‌ای (حاصل از روش AHP)

رتبه	زیرمعیار	وزن زیرمعیار	نسبت سازگاری	معیار	وزن معیار	نسبت سازگاری
۱	نوع سازه	۰/۲۷۸	۰/۰۳۲	کالبدی	۰/۵۴۲۱	۰/۰۶
	کیفیت سازه	۰/۳۲۶				
	سیستم مهار جانبی	۰/۱۳۰				
	قدمت سازه	۰/۰۹۷				
	ابعاد سازه	۰/۱۰۵				
	فواصل سازه‌ای	۰/۰۶۴				
۲	درصد کاربری مسکونی	۰/۳۷۶	۰/۰۷۳	زیرساختی	۰/۲۰۰۱	۰/۰۶
	دسترسی به شبکه حمل‌ونقل	۰/۲۲۸				
	کیفیت معبر مجاور	۰/۱۳۷				
	دسترسی به فضای باز و ایمن	۰/۰۸۷				
	دسترسی به کاربری‌های امدادی	۰/۰۸۸				
	فاصله از محدوده‌های پرخطر	۰/۰۵۷				
	دسترسی به خدمات شهری	۰/۰۲۷				
۳	میزان آمادگی	۰/۲۹۶	۰/۰۵۳	مدیریتی	۰/۱۱۲۴	۰/۰۶
	مرکز بحران	۰/۰۶۹				
	امکانات و تجهیزات	۰/۵۱۵				
	علائم و راهنما	۰/۱۲۱				
۴	تراکم جمعیت در منطقه	۰/۰۸۳	۰/۰۸۰	اجتماعی	۰/۰۸۳۹	۰/۰۶
	تعداد کل ساکنان	۰/۱۱۶				
	سطح سلامت	۰/۰۹۷				
	نسبت جنسی	۰/۰۱۲				
	بعد خانوار	۰/۱۱۴				
	نرخ سواد	۰/۵۷۸				
۵	وضعیت اشتغال – درآمد	۰/۲۱۲	۰/۰۶۲	اقتصادی	۰/۰۶۱۵	۰/۰۶
	متوسط قیمت مسکن	۰/۰۴۷				
	کمیت مسکن	۰/۱۵۳				
	کیفیت مسکن	۰/۵۸۸				

پاک‌سازی داده و مدیریت داده‌های ناقص

پیش از هرگونه تحلیل، داده‌ها از نظر خطاهای ورود، ناهماهنگی و نقص مورد بررسی قرار گرفت. این فرآیند بر شناسایی و مدیریت داده‌های پرت[12] و گم‌شده[13] تأکید دارد. طی این فرآیند داده‌های ناقص به دو صورت مدیریت شدند: در مواردی که میزان داده‌های گم‌شده کمتر از ۵ درصد برای یک متغیر بود، حذف موردی انجام شد و در مواردی که الگوی گم‌شدگی تصادفی تشخیص داده شد، از روش جایگزینی با میانگین برای متغیرهای پیوسته استفاده گردید (آزبرن و همکاران، ۲۰۰۴). هرگونه ناهماهنگی در داده‌ها نیز از طریق بازبینی مجدد رفع شد.

تبدیل داده‌های کیفی به کمی و کدگذاری

باتوجه‌به ماهیت چندمعیاره و ترکیبی (کمی و کیفی) پژوهش، برای تحلیل آماری، لازم بود داده‌های کیفی به کمی تبدیل شوند. این امر با به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های معتبر کدگذاری[14] و تحلیل محتوا[15] و مقیاس‌بندی[16] محقق شد. برای متغیرهای کیفی باز (مانند نظرات کارشناسان)، از روش تحلیل محتوای قراردادی استفاده شد (الو و همکاران، ۲۰۰۸). این فرآیند شامل واحدسازی، کدگذاری باز، کدگذاری محوری و درنهایت اختصاص یک مقدار عددی به هر مقوله بود. برای کمی‌سازی متغیرهای مشاهده‌ای نیز که همچون استفاده از پرسش‌نامه‌های طیف لیکرت جمع‌آوری شده بودند، از روش‌های ترتیبی[17] استفاده شد.

کنترل، روایی و پایایی

روایی محتوای پرسش‌نامه و چارچوب کدگذاری از طریق نظرسنجی خبرگان به دست آمد. همچنین، از تحلیل عاملی اکتشافی برای بررسی روایی سازه[18] مقیاس‌های استفاده‌شده بهره گرفته شد.

پایایی درونی پرسش‌نامه‌های طیف لیکرت با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ سنجیده شد که مقدار آن ۰/۷۳ به دست آمد و نشان‌دهنده پایایی داده‌ها است. برای سنجش پایایی فرآیند کدگذاری کیفی، از روش قابلیت اعتماد بین کدگذاران[19] استفاده شد. بدین‌صورت که ۲۰ درصد از نمونه‌ها توسط دو کدگذار مستقل، کدگذاری شده و میزان توافق با استفاده از ضریب کاپای کوهن اندازه‌گیری گردید. مقدار کاپا ۰/۸۲ به دست آمد که نشان‌دهنده توافق قوی است.

کنترل کیفیت در طول فرآیند

کنترل کیفیت یک فرآیند مستمر بود. علاوه‌بر اقدامات فوق، منطق و یکپارچگی کلی داده‌ها پس از کمی‌سازی از طریق آمار توصیفی و ترسیم نمودارهای جعبه‌ای برای شناسایی ناهنجاری‌های باقیمانده، مجدداً مورد بررسی قرار گرفت. این رویکرد نظام‌مند، دقت، اعتبار و قابلیت اتکای داده‌ها را برای انجام تحلیل‌های پیشرفته آماری و تصمیم‌گیری در مراحل بعدی تحقیق تضمین نمود.

انتخاب نمونه‌ها

فرآیند انتخاب نمونه‌ها در راستای تحقق سنجش عملیاتی تاب‌آوری لرزه‌ای، با رویکردی علمی و مبتنی بر معیارهای چندگانه صورت گرفت. برای این منظور، از روش نمونه‌گیری ترکیبی متشکل از روش‌های خوشه‌ای، تصادفی و طبقه‌بندی‌شده بهره گرفته شد. طی این روش، ابتدا شهر براساس همگنی در معیارهای کالبدی، زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی، به مناطق مجزا تقسیم‌بندی شد. این طبقه‌بندی اولیه، به شناسایی دو نوع بافت اصلی شهری، شامل بافت فرسوده و بافت میانی-جدید، منجر گردید که هرکدام ویژگی‌ها و چالش‌های خاص خود را در زمینه تاب‌آوری دارا هستند. در مرحله بعد، از هریک از این بافت‌ها، تعدادی محله به‌عنوان خوشه نمونه انتخاب شدند تا تنوع موجود در هر بافت به‌طور مناسبی پوشش داده شود. درنهایت، در داخل هر خوشه نمونه، ساختمان‌ها به‌صورت تصادفی برای ارزیابی‌های دقیق‌تر و جزئی‌تر انتخاب گردیدند. این روش نمونه‌گیری ترکیبی، با ایجاد پوشش مناسب و نمایندگی کافی از تنوع بافت‌های شهری، اطمینان حاصل می‌کند که نتایج سنجش تاب‌آوری از اعتبار لازم برخوردار بوده و قابلیت تعمیم به سایر مناطق مشابه در شهر را دارا باشد.

ساختمان‌های نمونه از میان آپارتمان‌های مسکونی متداول شهر مشهد برای قشر متوسط اجتماعی انتخاب شد. مساحت قطعات انتخاب‌شده بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ متر مربع متغیر و تعداد طبقات بین ۳ تا ۶ طبقه است. درمجموع، ۵۱ واحد مسکونی از ۱۰ ساختمان، با ۱۰۹ نفر جمعیت و ۵۱ خانواده، با نسبت جنسیتی ۵۳/۵۶ (زن به مرد) انتخاب گردید. جدول شماره ۵ کروکی موقعیت مکانی و تصویر نمای اصلی نمونه‌های انتخاب‌شده را نمایش می‌دهد.

تحلیل داده‌ها

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای به‌دلیل ماهیت چندبعدی آن، مستلزم رویکردی است که بتواند هم پیچیدگی داده‌ها را مدیریت کند و هم اهمیت نسبی معیارهای مختلف را منعکس نماید. برای دستیابی به این هدف، در این مطالعه از یک چارچوب ترکیبی

12. Outlier Data
13. Missing Data
14. Coding
15. Content Analysis
16. Scaling
17. Ordinal
18. Construct Validity
19. Inter-coder Reliability

تحلیل مؤلفه اصلی[20] و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[21] استفاده شده است. این تلفیق، عینیت تحلیل آماری را با قضاوت‌های کارشناسی تلفیق می‌کند تا به ارزیابی جامع و متعادلی دست یابد (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۲).

پیش‌پردازش داده‌ها

به‌منظور آماده‌سازی داده‌ها برای تحلیل، عملیات پیش‌پردازش با تمرکز بر استانداردسازی[22] انجام پذیرفت. دلیل اصلی این اقدام، تفاوت در مقیاس‌های اندازه‌گیری متغیرها بود. استانداردسازی، با تبدیل تمامی متغیرها به مقیاسی بدون واحد، با میانگین (۰) و انحراف‌معیار (۱)، از سلطه احتمالی متغیرهای دارای واریانس بالاتر جلوگیری می‌کند. این گام اساسی، پیش‌نیاز ضروری برای اجرای تحلیل مؤلفه اصلی به شمار می‌رود و دقت و قابلیت اعتماد نتایج را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (فریگریو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین جهت آزمودن برازش توزیع نرمال داده‌ها از آزمون شاپیرو-ویلک[23] استفاده شد و برای این منظور مقدار (P) محاسبه گردید

تحلیل مؤلفه اصلی

تحلیل مؤلفه اصلی با هدف کاهش ابعاد داده‌ها، شناسایی ساختار زیربنایی و تعیین عینی‌ترین مجموعه از متغیرهای مؤثر بر تاب‌آوری لرزه‌ای انجام شد. این تحلیل بر مبنای ماتریس همبستگی حاصل از ۲۷ متغیر استانداردشده صورت گرفت. در ابتدای فرآیند، ضریب همبستگی اسپیرمن[24] میان هر جفت متغیر محاسبه و ماتریس تشکیل گردید. سپس، مقادیر ویژه[25] و بردارهای ویژه[26] ماتریس کواریانس که قادر به تعیین جهت توزیع‌شدگی داده‌ها هستند، محاسبه شدند. دراین‌میان، به‌منظور اطمینان از اعتبار نتایج، کنترل هم‌خطی متغیرها، کفایت نمونه‌ها و وجود همبستگی کافی بین متغیرها با استفاده از آزمون‌های کی ام او[27] و بارتلت[28] مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای تعیین تعداد بهینه مؤلفه‌های اصلی، متغیرهایی که دارای مقدار ویژه بزرگ‌تر از (۱) بودند، حفظ شدند. علاوه‌براین، از نمودار سنگ‌ریزه[29] برای تعیین نقطه شکست استفاده گردید.

20. Principal Component Analysis (PCA)
21. Analytical Hierarchy Process (AHP)
22. Z-Score Normalization
23. Shapiro-Wilk
24. Spearman
25. Eigenvalues
26. Eigenvectors
27. Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)
28. Bartlett
29. Scree Plot

نقطه شکست[30] در نمودار سنگ‌ریزه که نمایانگر کاهش شدید شیب منحنی است، به‌عنوان شاخصی برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی بهینه در نظر گرفته شد. به‌منظور ساده‌سازی ساختار عاملی و تسهیل تفسیرپذیری نتایج، از روش چرخش واریماکس[31] استفاده شد. متغیرهایی که دارای بار عاملی[32] مطلق بزرگ‌تر از (۰/۶) بر روی یک مؤلفه بودند، به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در آن بعد شناسایی شدند. متغیرهایی که بار عاملی آن‌ها در هیچ مؤلفه‌ای به این آستانه نرسید یا به‌طور هم‌زمان روی چند مؤلفه بار داشتند[33]، از تحلیل نهایی حذف گردیدند. نتایج خروجی از تحلیل مؤلفه اصلی، مجموعه عینی و کاهش‌یافته‌ای از متغیرها را فراهم نمود که به‌عنوان پایه و اساس ساختار تحلیل سلسله مراتبی مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل سلسله مراتبی

در گام بعد برای وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارهای شناسایی‌شده از تحلیل مؤلفه اصلی، از روش تحلیل سلسله مراتبی توسعه یافته توسط ساتی (۱۹۷۷) استفاده شد. برای گردآوری داده‌ها در این بخش، یک پرسش‌نامه مقایسات زوجی مبتنی بر مقیاس ۹ نقطه‌ای ساتی (جدول شماره ۶) طراحی شد و از ۶ خبره دارای سوابق دانشگاهی و اجرایی در حوزه ساختمان، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران خواسته شد تا اهمیت نسبی معیارهای اصلی استخراج‌شده از تحلیل مؤلفه اصلی و همچنین زیرمعیارها در هر معیار را نسبت به یکدیگر مقایسه کنند. برای هر مقایسه زوجی، ماتریس مقایسه تشکیل و وزن نهایی هر عامل با استفاده از روش میانگین هندسی[34] نظرات خبرگان و رویکرد بردار ویژه محاسبه گردید. برای اطمینان از قابلیت اعتماد قضاوت‌ها، نسبت سازگاری (CR35) برای هر ماتریس محاسبه شد. براین‌اساس، تنها ماتریس‌هایی که نسبت سازگاری آن‌ها کمتر یا مساوی ۰/۱ بود، قابل‌قبول در نظر گرفته شدند. در غیر این صورت، نظرات به خبرگان بازگردانده شده تا بازبینی شوند. میانگین نرخ سازگاری نهایی برای تمامی ماتریس‌ها ۰/۰۶ بود که نشان‌دهنده قضاوت‌های سازگار و قابل‌اطمینان است.

ترکیب نتایج PCA و AHP

خروجی نهایی این فرآیند ترکیبی، تعیین وزن نهایی برای هریک از شاخص‌های تاب‌آوری بود. این وزن‌ها از طریق حاصل‌ضرب وزن هر شاخص در سطح خود (در ساختار درختی معیارها) و وزن معیار بالادستی مربوطه (مؤلفه اصلی که شاخص

30. Elbow Point
31. Varimax Rotation
32. Factor Loading
33. Cross-Loading
34. Geometric Mean
35. Consistency Ratio

در آن قرار دارد) محاسبه شدند. این وزن‌های تلفیقی، هم اهمیت ذاتی هر شاخص براساس نظرات کارشناسی و هم نقش آن در ساختار کلی تاب‌آوری براساس تحلیل داده‌ها را به‌طور هم‌زمان منعکس می‌کنند. درنهایت، وزن‌های حاصله، مبنای محاسبه نمره تاب‌آوری برای هریک از آپارتمان‌های مسکونی مورد بررسی در شهر مشهد قرار گرفتند.

یافته‌ها

آمار توصیفی و بررسی نرمالیتی

داده‌های این پژوهش شامل ۲۷ متغیر کمی، ذیل ۵ معیار کالبدی، زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی بود که برای نمونه‌های گردآوری شد. پیش از انجام تحلیل‌های چندمتغیره، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد توزیع اکثر متغیرها (۲۳ متغیر) با سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ (P<۰/۰۵) از فرض نرمال بودن پیروی نمی‌کنند. براین‌اساس، برای ادامه تحلیل‌ها از روش‌های ناپارامتریک، به‌ویژه ضریب همبستگی اسپیرمن و تحلیل عاملی مبتنی بر ماتریس همبستگی اسپیرمن استفاده شد.

بررسی کفایت داده‌ها و معناداری همبستگی‌ها

پیش از استخراج مؤلفه‌های اصلی، شرایط لازم برای اجرای تحلیل عاملی با آزمون کی ام او و بارتلت سنجیده شد. مقدار شاخص کی ام او که کفایت نمونه‌گیری را می‌سنجد، ۰/۸۴۲به دست آمد که بالاتر از آستانه قابل‌قبول ۰/۷ است و نشان‌دهنده کفایت بالای داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی است. نتیجه آزمون بارتلت نیز برای بررسی معناداری کلی ماتریس همبستگی، با مقدار کای-اسکوئر تقریبی ۲۱۸۷/۳۴و سطح معناداری (P<۰/۰۰۱) بود که فرض صفر (یکسان بودن ماتریس همبستگی با ماتریس واحد) رد شد. این نتیجه حاکی از وجود همبستگی‌های کافی و معنادار بین متغیرها برای انجام تحلیل عاملی است.

تحلیل ماتریس همبستگی اسپیرمن

بررسی ماتریس همبستگی اسپیرمن که در جدول شماره ۷ ارائه شده است، الگوهای معناداری را بین متغیرها نشان داد. به‌طور خلاصه، قوی‌ترین همبستگی‌های مثبت معنادار (P<۰/۰۱ و r_s>۰/۷) بین متغیرهای مربوط به مؤلفه کالبدی مشاهده شد. همچنین، همبستگی مثبت قابل‌توجه بین متغیرهای کیفیت مسکن، نرخ سواد، امکانات و تجهیزات ضروری با دیگر متغیرها وجود داشت. ازسوی‌دیگر، همبستگی‌های منفی معناداری بین متغیر درصد کاربری مسکونی از مؤلفه زیرساختی با سایر متغیرها شناسایی شد (P<۰/۰۵ و rs~>۰/۶۵). این یافته‌ها به‌طور مقدماتی، وجود ابعاد پنهان و ساختار زیربنایی در داده‌ها را تأیید می‌کند.

استخراج مؤلفه‌های اصلی

جهت کاهش ابعاد داده‌ها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی با چرخش واریماکس و دو معیار مقدار ویژه بالاتر از ۱ و نمودار سنگ‌ریزه استفاده شد. نمودار سنگ‌ریزه (تصویر شماره ۳) شکست واضحی را پس از مؤلفه پنجم نشان می‌دهد که تأییدکننده استخراج ۵ مؤلفه اصلی است. درنهایت، ۵ مؤلفه اصلی استخراج شد که در مجموع ۸۲/۳۲ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند. میزان واریانس هر مؤلفه در جدول شماره ۸ ارائه شده است.

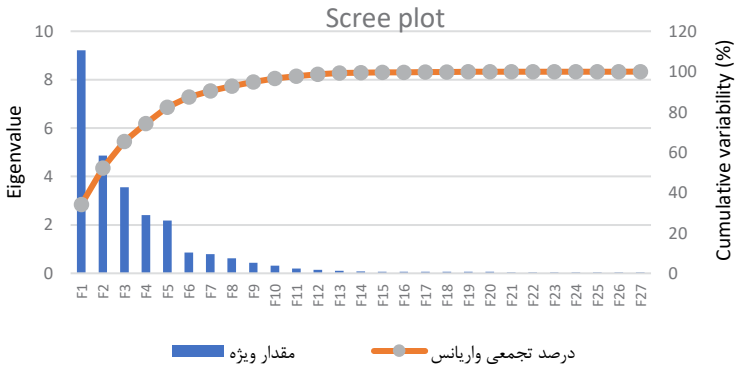
پس از استخراج اولیه مؤلفه‌ها، برای ساده‌تر کردن تفسیر آن‌ها از چرخش واریماکس استفاده شد. این چرخش سعی می‌کند واریانس را بین عوامل حداکثر کند تا هر متغیر فقط روی یک عامل بار عاملی بالا داشته باشد. این کار باعث می‌شود عوامل به‌راحتی قابل‌نام‌گذاری و تفسیر شوند. بارهای عاملی متغیرها پس از چرخش واریماکس در جدول شماره ۹ و تصویر شماره ۴ نشان می‌دهد هر متغیر به کدام مؤلفه تعلق دارد.

تعیین وزن معیارها

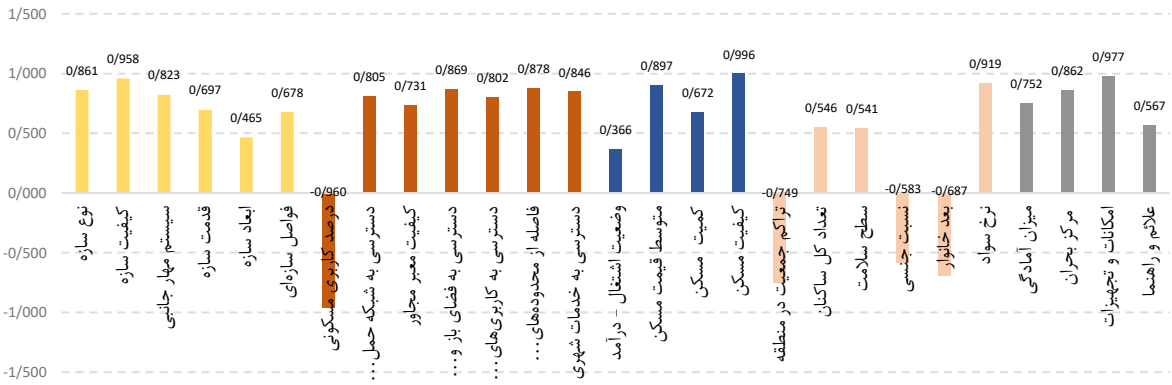
برای وزن‌دهی به معیارها و تلفیق آن‌ها در یک شاخص ترکیبی نهایی، از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. داده‌های موردنیاز برای این روش از طریق پرسش‌نامه مقایسات زوجی و براساس نظرات خبرگان گردآوری شد. پس از جمع‌آوری پرسش‌نامه‌ها، ماتریس مقایسات زوجی برای هریک از خبرگان تشکیل و وزن هر معیار و نسبت سازگاری مربوط به آن محاسبه گردید. میانگین هندسی نظرات همه خبرگان به‌عنوان مقایسه زوجی نهایی در نظر گرفته شد. وزن معیارها، زیرمعیارها و نسبت سازگاری نهایی محاسبه شد که نتایج آن در جدول شماره ۱۰ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار CR نهایی برابر با ۰/۰۶ است که از ۰/۱ کمتر بوده و نشان‌دهنده قابلیت اعتماد و سازگاری بالای قضاوت‌های خبرگان است.

براساس تحلیل جامع داده‌های گردآوری‌شده و نتایج حاصل از ارزیابی چندمعیاره شاخص‌های تاب‌آوری لرزه‌ای، وضعیت ۱۰ ساختمان مسکونی منتخب در شهر مشهد در تصاویر شماره ۵ و ۶ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد نمونه شماره ۲ در اغلب متغیرهای موردارزیابی، بالاترین امتیاز را کسب نموده و به‌عنوان تاب‌آورترین ساختمان در میان نمونه‌های بررسی‌شده شناسایی شده است. در مقابل، نمونه شماره ۱۰ در اکثر شاخص‌ها پایین‌ترین امتیاز را به خود اختصاص داده و آسیب‌پذیرترین ساختمان در برابر خطر زلزله ارزیابی گردیده است.

همچنین، قابل‌توجه است که ساختمان‌های واقع در بافت مرکزی و قدیم شهر، به‌طورکلی پایین‌ترین سطح تاب‌آوری را در مقایسه با سایر مناطق از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که ساختمان‌های واقع در بافت جدید شهر مشهد، از منظر



تصویر ۳. نمودار سنگ‌ریزه مقدار ویژه مؤلفه‌های استخراج شده (حاصل از روش PCA)



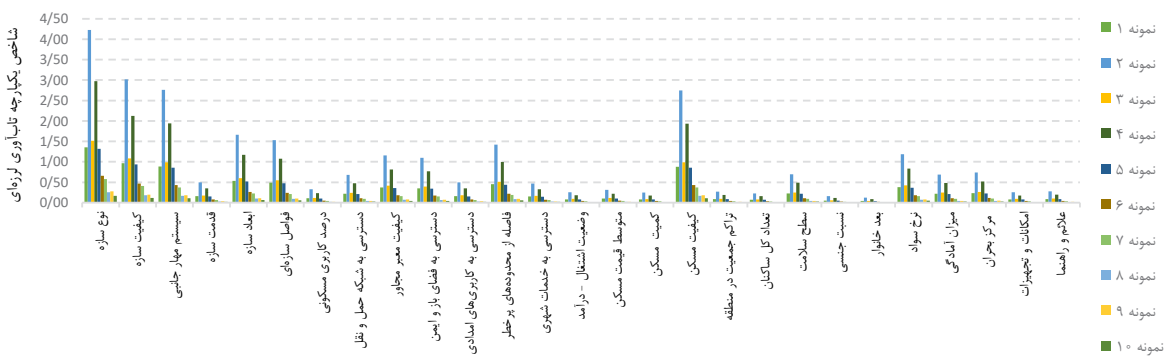
تصویر ۴. میزان بار عاملی متغیرها (بر اساس داده‌های جدول ۹)

تاب‌آوری لرزه‌ای، در شرایط به مراتب بهتری قرار داشته و از تاب‌آوری بالاتری در برابر اثرات ناشی از زلزله برخوردار هستند.

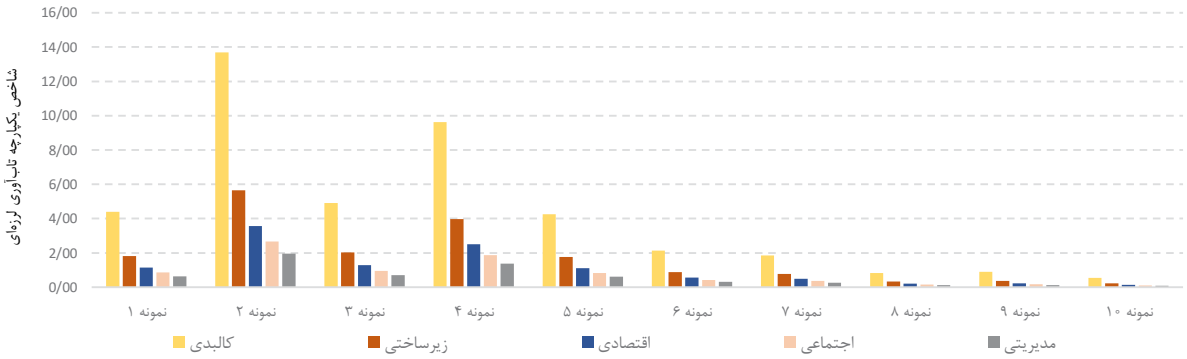
بحث

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر کالبدی

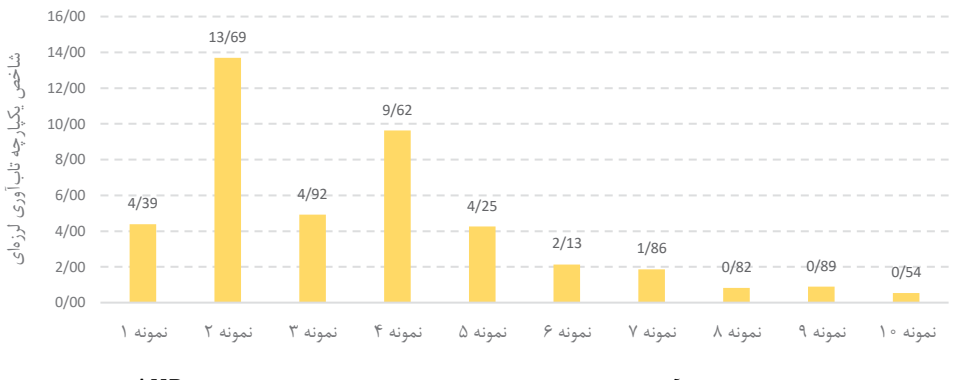
متغیرهای متعددی وجود دارد که می‌تواند تاب‌آوری کالبدی را بازنمایی کند، اما در این پژوهش متغیرهایی که بیشترین تأکید در ادبیات را داشته و شرایط اندازه‌گیری دقیق و امکان دسترسی را نیز دارا بودند، همچون نوع سازه، کیفیت سازه، سیستم مهار جانبی، قدمت سازه، ابعاد سازه و فواصل سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. از این میان نوع سازه، کیفیت سازه و سیستم مهار جانبی، نقش مهم‌تری در تأمین تاب‌آوری لرزه‌ای ایفا می‌کنند و مرتبط‌ترین پیش‌بینی کننده‌ها در این موارد هستند. همبستگی‌ای قوی بین تاب‌آوری لرزه‌ای و این متغیرها وجود دارد اما گاهی به نتیجه‌گیری‌های نادرست منجر می‌شود.



تصویر ۵. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها به تفکیک هر متغیر (حاصل از روش AHP)



تصویر ۶. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها به تفکیک هر معیار (حاصل از روش AHP)

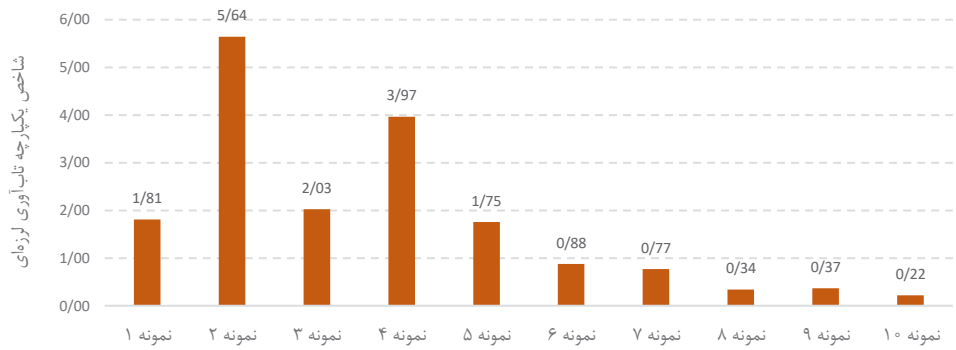


تصویر ۷. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها در بعد کالبدی (حاصل از روش AHP)

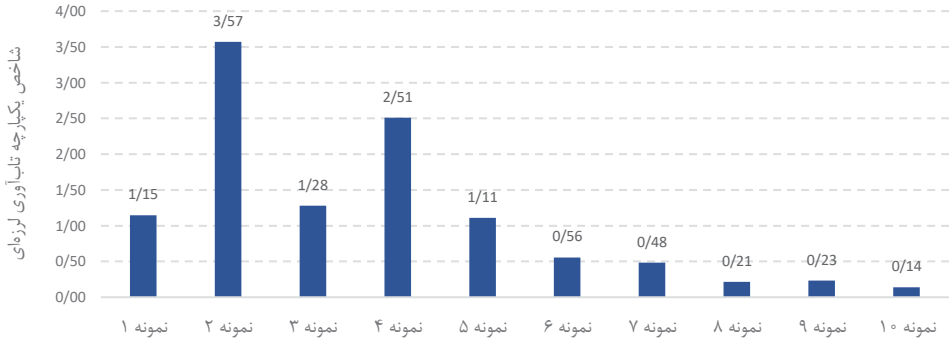
آپارتمان‌هایی با بیش از چهار طبقه، افراد بیشتری را در درون خود جای می‌دهند و ارزش دارایی بالاتری دارند، اما به‌دلیل روش‌ها، کیفیت و مصالح ساخت، آن‌ها خطر فروریختن کمتر و تاب‌آوری بیشتری دارند. ساختمان‌هایی با تاب‌آوری کمتر، عمدتاً کوتاه مرتبه و در بافت قدیم شهر قرار دارند (تصویر شماره ۷).

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر زیرساختی

متغیرهای موردبررسی در این پژوهش جهت تاب‌آوری زیرساختی شامل درصد پوشش کاربری مسکونی در محدوده ساختمان موردبررسی، شرایط دسترسی ساختمان به شبکه حمل‌ونقل و معابر اصلی، کیفیت معبر مجاور در شرایط خطر، دسترسی به فضای باز و ایمن، دسترسی به کاربری‌های امدادی (درمانی، آتش‌نشانی، پلیس)، فاصله از محدوده‌ها، اماکن و کاربری‌های پرخطر و دسترسی به خدمات شهری (آب، برق، گاز، تلفن، اینترنت و غیره) می‌باشد.



تصویر ۸. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها در بعد زیرساختی (حاصل از روش AHP)



تصویر ۹. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها در بعد اقتصادی (حاصل از روش AHP)

تراکم بالای ساختمان‌های شهری تاب‌آوری را کاهش می‌دهد، زیرا می‌تواند موانعی را در صورت آسیب لرزه‌ای ایجاد کند. در مناطق مرکزی شهری، امکان فروریختن ساختمان‌ها می‌تواند دسترسی به داخل منطقه را مسدود کند، درحالی‌که در مناطق جدیدتر که دارای درصد بالاتری از فضاهای باز و تراکم کمتر خانه‌ها هستند، تاب‌آوری افزایش می‌یابد (تصویر شماره ۸). همچنین فاصله از مراکز امدادی، خدماتی، امکان تردد و فاصله از اماکن پرخطر با شانس بقا و افزایش تاب‌آوری ارتباط معناداری دارد.

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر اقتصادی

شرایط تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر اقتصادی با وضعیت اشتغال - درآمد، متوسط قیمت، کمیت و کیفیت مسکن ارزیابی شده است که دراین‌میان کیفیت مسکن بیشترین تأثیر را بر میزان تاب‌آوری لرزه‌ای داشته است. وضعیت نمونه‌های موردبررسی از این منظر در تصویر شماره ۹ نمایش داده شده است.

ارزیابی روند تغییرات داده‌های متغیرهای اقتصادی در میان ده نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد پارامتر کیفیت مسکن شاخص بسیار تعیین کننده‌ای در میزان تاب‌آوری از منظر اقتصادی است.

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر اجتماعی

جمعیت افرادی که در معرض زلزله قرار می‌گیرد، مهم‌ترین متغیری است که باید در هنگام ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای در نظر گرفته شود. جهت ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر اجتماعی، تراکم جمعیت در منطقه، تعداد کل ساکنان، سطح سلامت بدنی - متوسط سن، نسبت جنسی، بعد خانوار و نرخ سواد مورد بررسی قرار گرفت که از میان آن‌ها نرخ سواد، نقش مهم‌تری در تأمین تاب‌آوری لرزه‌ای ایفا می‌کند. شرایط نمونه‌های موردبررسی از منظر اجتماعی در تصویر شماره ۱۰ نمایش داده شده است.

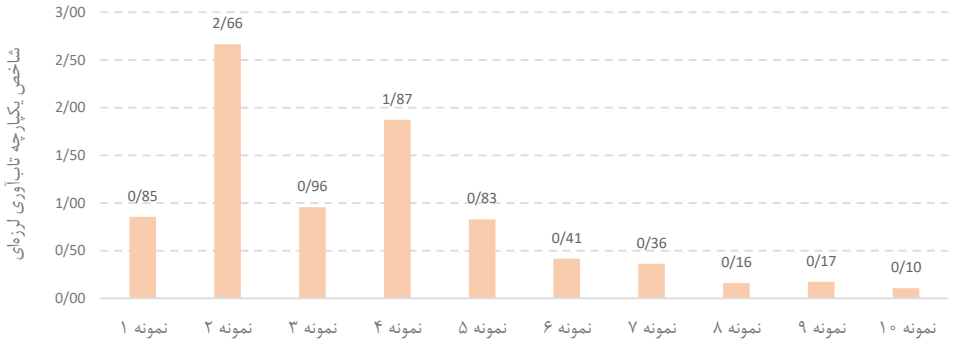
علاوه‌بر متغیر نرخ سواد، سطح سلامت افراد نیز رابطه بسیار نزدیکی با تأمین شرایط تاب‌آوری دارد. براین‌اساس می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که متغیرهای تأمین تاب‌آوری از بعد اجتماعی وجوه مشترک بسیاری با سطح کیفیت زندگی اجتماعی و مؤلفه‌های فرهنگی و آموزشی جامعه دارد.

ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای از منظر مدیریتی

متغیرهای مدیریتی مؤثر بر تاب‌آوری لرزه‌ای پیچیدگی و گستردگی بسیاری دارد، اما به‌طور کلی در دو بخش موارد قبل از زلزله و موارد پس از زلزله قابل‌بررسی هستند. در این پژوهش، میزان آمادگی مدیریت شهری در صورت وقوع زمین‌لرزه، وجود مراکز چند منظوره و بحران در شعاع دسترس نمونه‌های موردبررسی، امکانات و تجهیزات ضروری پیش‌بینی‌شده قبل از بحران و نصب علائم و راهنمای مناسب جهت دسترسی‌های اضطراری، از متغیرهایی است که مورد ارزیابی قرار گرفته است و براساس آن وضعیت نمونه‌های مورد بررسی را می‌توان مقایسه نمود (تصویر شماره ۱۱).

مؤلفه‌های اصلی تاب‌آوری لرزه‌ای

نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی، نمایانگر وجود همبستگی‌های معنادار بین متغیرهای موردمطالعه و میزان تاب‌آوری لرزه‌ای ساختمان‌ها است. براساس این تحلیل، مؤلفه کالبدی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های اصلی، بیشترین تأثیر را در تعیین سطح تاب‌آوری لرزه‌ای ایفا می‌کند. دراین‌میان، باتوجه‌به ارتباط مستقیم بین پارامترهای ارزیابی‌شده و شاخص‌های تاب‌آوری، می‌توان اذعان کرد که کیفیت مسکن، با ضریب بار عاملی ۰/۹۹۶، نقش بسزایی در تضمین و ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای آپارتمان‌های مسکونی در شهر مشهد دارد. این یافته‌ها بر اهمیت توجه ویژه به جنبه‌های کالبدی و به‌طور خاص، کیفیت ساخت‌وساز مسکن، در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با کاهش خطرپذیری لرزه‌ای و افزایش ایمنی شهروندان تأکید می‌نماید. بنابراین، بهبود کیفیت مسکن



تصویر ۱۰. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها در بعد اجتماعی (حاصل از روش AHP)

می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در جهت تقویت تاب‌آوری لرزه‌ای جوامع شهری مورد توجه قرار گیرد.

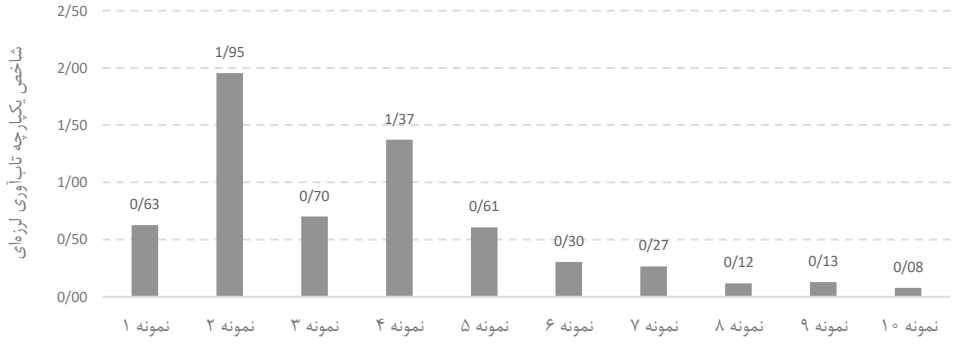
محدودیت‌های پژوهش

انجام این پژوهش با محدودیت‌هایی همچون دشواری در کمی‌سازی برخی شاخص‌های کیفی مانند سرمایه اجتماعی یا انسجام محله‌ای که به روش‌های غیرمستقیم سنجش نیاز دارد، وابستگی داده‌ها به دقت و صراحت پاسخ‌دهندگان در ارائه اطلاعات و نیاز به تخصص‌های میان‌رشته‌ای برای تحلیل جامع داده‌ها، روبه‌رو بود.

در این پژوهش، به‌منظور تمرکز بر مقایسه عملکردی گزینه‌های موردبررسی در بافت شهری مشهد، پارامترهای اقلیمی و جغرافیایی و همچنین سناریوهای وقوع زلزله، برای تمامی گزینه‌ها به‌صورت یکسان در نظر گرفته شده‌اند. این در حالی است که شرایط اقلیمی، موقعیت جغرافیایی و شدت زلزله‌های محتمل، می‌توانند به‌طور بالقوه، تأثیرات متفاوتی بر میزان تاب‌آوری لرزه‌ای هریک از گزینه‌ها اعمال نمایند. همچنین، متغیر امنیت سایبری و اطلاعاتی، به‌ویژه در بخش مدیریتی، به‌عنوان یک عامل مؤثر و تعیین‌کننده شناخته می‌شود. باوجوداین، به‌دلیل محدودیت‌های موجود در دسترسی به منابع معتبر و داده‌های کافی، این متغیر در پژوهش مورد ارزیابی دقیق قرار نگرفت. توصیه می‌شود در پژوهش‌های آتی، این جنبه مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

همچنین علی‌رغم بهره‌گیری از تحلیل مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان مبنایی عینی برای وزن‌دهی اولیه، مرحله قضاوت و ارزیابی در تحلیل سلسله مراتبی ماهیتی ذهنی دارد. به‌منظور کاهش این محدودیت ذاتی، معیار کنترل نرخ سازگاری به‌طور دقیق و سخت‌گیرانه اعمال گردید. علاوه‌براین، تلاش وافری به عمل آمد تا از نظرات و تخصص کارشناسان خبره و مجرب در این زمینه استفاده شود. بااین‌حال، دستیابی به اجماع کامل در تمامی مقایسات زوجی، امری دشوار و چالش‌برانگیز بود. به‌منظور کاهش این چالش، از میانگین هندسی نظرات کارشناسان استفاده شد که تا حدودی به رفع این محدودیت کمک نمود.

درنهایت، تعمیم‌پذیری یافته‌های این پژوهش محدود به بافت شهری مشهد است و وزن‌های به‌دست‌آمده، خاص این منطقه می‌باشند. بنابراین، برای استفاده از این نتایج در سایر شهرها، ضروری است که فرآیند بومی‌سازی متناسب با شرایط و ویژگی‌های خاص هر شهر، به‌طور جداگانه انجام شود.



تصویر ۱۱. مقایسه تاب‌آوری لرزه‌ای یکپارچه نمونه‌ها در بعد مدیریتی (حاصل از روش AHP)

نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارائه یک چارچوب کمی و یکپارچه، تاب‌آوری لرزه‌ای را از یک مفهوم نظری به یک مقیاس عملیاتی و قابل‌اندازه‌گیری برای شهر مشهد تبدیل کرده است. یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند سرمایه‌گذاری صرف در حوزه مهندسی بدون توجه هم‌زمان به مؤلفه‌های اجتماعی و مدیریتی، راهبرد کاملی برای افزایش تاب‌آوری نیست. مدل ارائه‌شده در این تحقیق نه‌تنها یک ابزار قدرتمند برای برنامه‌ریزان شهری و مدیران بحران مشهد به شمار می‌رود، بلکه می‌تواند به‌عنوان الگویی متدولوژیک برای سایر کلان‌شهرهای ایران که با چالش‌های مشابهی روبه‌رو هستند، نیز به کار گرفته شود. اجرای راهکارهای پیشنهادی مبتنی بر اولویت‌بندی علمی، می‌تواند تاب‌آوری کلان‌شهر مشهد را در برابر زلزله به‌طور معناداری افزایش داده و از تبدیل یک رویداد طبیعی به یک فاجعه انسانی گسترده جلوگیری کند.

تحلیل‌های کمی انجام‌شده با ترکیب روش‌های AHP و PCA نشان داد سهم شاخص‌های کالبدی و زیرساختی در تاب‌آوری کل، با مجموع وزن ۷۴/۲۲ درصد بسیار برجسته‌تر از سایر ابعاد است. در میان متغیرهای مؤثر بر تاب‌آوری نیز کیفیت مسکن با بار عاملی ۰/۹۹۶، امکانات و تجهیزات ضروری با بار عاملی ۰/۹۷۷، درصد کاربری مسکونی با بار عاملی ۰/۹۶۰-، کیفیت سازه با بار عاملی ۰/۹۵۸ و نرخ سواد با بار عاملی ۰/۹۱۹ بیشترین تأثیر را در محاسبه تاب‌آوری یکپارچه دارند. ازسوی‌دیگر، اگرچه شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی با مجموع وزن ۱۴/۵۴ درصد سهم کمتری در تأمین تاب‌آوری دارند، اما بار عاملی متغیرهای کیفیت مسکن (۰/۹۹۶) و نرخ سواد (۰/۹۱۹) نشان می‌دهد تمرکز جمعیت‌های با درآمد پایین و سطح تحصیلات محدود به‌ویژه در بافت‌های فرسوده، یک نقطه بحرانی تشدیدکننده خطر است، به‌طوری‌که در این محلات، شاخص تاب‌آوری در بعد اجتماعی پایین‌ترین مقدار در مقایسه با سایر مناطق شهر است.

باتوجه‌به اینکه یافته‌های کمی حاصل شده، راهکارهای ارتقای تاب‌آوری شهری در سه اولویت کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت دسته‌بندی و ارائه می‌شوند. در اولویت اول که ماهیتی کوتاه‌مدت و مداخلات کالبدی-مدیریتی دارد، تمرکز بر اجرای برنامه‌های ضربتی، ممیزی فنی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، به‌ویژه در مناطقی با شاخص کیفیت ساخت پایین‌تر از ۰/۵ است. همچنین، تأمین و تجهیز فضاهای شهری با امکانات ضروری و حذف موانع فضایی دسترسی به این فضاها از جمله اقدامات حیاتی به شمار می‌رود. در اولویت دوم با رویکردی میان‌مدت و مبتنی بر ظرفیت‌سازی در حوزه زیرساختی، ایجاد و افزایش سرانه فضای باز در مناطق شناسایی‌شده به‌عنوان کانون‌های پرریسک با تاب‌آوری بسیار پایین در دستور کار قرار گیرد. به موازات آن، تدوین یک سامانه اطلاعاتی یکپارچه ساختمان‌ها[۳۶] با هدف رصد و به‌روزرسانی مستمر شاخص‌های کالبدی، ضروری است. درنهایت، اولویت سوم با افقی بلندمدت و معطوف به توانمندسازی اجتماعی، بر اجرای برنامه‌های آموزشی هدفمند برای ساکنان محلات پرریسک با محتوای واکنش در بحران، منطبق با ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی همان جامعه محلی تأکید دارد. برنامه‌ریزی برای ارتقای سطح سواد و آگاهی شهروندان نیز به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از این اولویت بلندمدت مورد توجه قرار می‌گیرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه، تمام اصول اخلاق در پژوهش رعایت شد. ازآنجایی‌که هیچ آزمایشی بر روی نمونه‌های حیوانی یا انسانی انجام نشد، هیچ کد اخلاقی اخذ نشد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی، تحقیق و بررسی، نگارش پیش‌نویس، ویراستاری و نهایی‌سازی نوشته: احسان بیگلری و علی بیگلری؛ نظارت: علی بیگلری.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

36. Building Information System

References

Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: Are they related? *Progress in Human Geography, 24*(3), 347-364. [DOI:10.1191/030913200701540465]

Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockström, J. (2005). Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters. *Science, 309*(5737), 1036-1039. [DOI:10.1126/science.1112122] [PMID]

Alberti, M. (2005). The Effects of Urban Patterns on Ecosystem Function. *International Regional Science Review, 28*(2), 168-192. [DOI:10.1177/0160017605275160]

Allami, M., Biglari, E., & Biglari Fadafan, A. (2024). [Solutions to Optimize Energy Consumption in the Architecture of Cold Climate Regions (Persian)]. *Iranian Journal of Energy, 27*(1), 25-46. [Link]

Amanpour, S., Mohammadi Deh Cheshme, M., & Alizadeh, M. (2016). [Evaluating vulnerability of kuhdasht urban infrastructure's through passive defense approach (Persian)]. *Town and Country Planning, 8*(1), 133-154. [DOI:10.22059/jtcp.2016.59145]

Anwar, G. A., Dong, Y., & Li, Y. (2020). Performance-based decision-making of buildings under seismic hazard considering long-term loss, sustainability, and resilience. *Structure and Infrastructure Engineering, 17*(4), 454-470. [DOI:10.1080/15732479.2020.1845751]

Armas, I., Ionescu, R., & Posner, C. N. (2015). Flood risk perception along the Lower Danube river, Romania. *Natural Hazards, 79*(3), 1913-1931. [DOI:10.1007/s11069-015-1939-8]

Aslani, F., Amini Hosseini, K., & Fallahi, A. (2019). Evaluation of physical resilience of Karaj city against earthquake. *Quarterly Scientific Journal of Rescue and Relief, 11*(1), 68-71. [DOI:10.52547/jorar.11.1.68]

Aslani, F., & Amini Hosseini, K. (2018). [An overview to the concepts, indicators, frames and models of earthquake resilience (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly), 8*(2), 119-136. [Link]

Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., & Zinke, T. (2013). Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach. *Journal of Infrastructure Systems, 20*(2), 04014004. [DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177]

Boon, H. J., Cottrell, A., King, D., Stevenson, R. B., & Millar, J. (2012). Bronfenbrenners bioecological theory for modelling community resilience to natural disasters. *Natural Hazards, 60*(2), 381-408. [DOI:10.1007/s11069-011-0021-4]

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., & Reinhorn, A. M., et al. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra, 19*(4), 733-752. [DOI:10.1193/1.1623497]

Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra, 23*(1), 41-62. [DOI:10.1193/1.2431396]

Burton, H. V., Deierlein, G., Lallemant, D., & Lin, T. (2015). Framework for Incorporating Probabilistic Building Performance in the Assessment of Community Seismic Resilience. *Journal of Structural Engineering, 142*(8), C4015007. [DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001321]

Carreño, M. L., Cardona, O. D., & Barbat, A. H. (2007). Urban seismic risk evaluation: A holistic approach. *Natural Hazards, 40*(1), 137-172. [DOI:10.1007/s11069-006-0008-8]

Chee Yin, H., Kassem, M. M., & Mohamed Nazri, F. (2022). Comprehensive Review of Community Seismic Resilience: Concept, Frameworks, and Case Studies. *Advances in Civil Engineering, 2022*(1), 7668214. [DOI:10.1155/2022/7668214]

Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures, 32*(11), 3639-3649. [DOI:10.1016/j.engstruct.2010.08.008]

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly, 84*(2), 242-261. [DOI:10.1111/1540-6237.8402002]

De Risi, R., Bhattacharya, S., & Goda, K. (2018). Seismic performance assessment of monopile-supported offshore wind turbines using unscaled natural earthquake records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109,* 154-172. [DOI:10.1016/j.soildyn.2018.03.015]

Dodanwala, T. C., & Ruparathna, R. (2024). Ensuring the resilience of multi-unit residential buildings (MURBs): A building information modeling (BIM)-based evaluation approach. *Sustainable and Resilient Infrastructure, 9*(5), 421-443. [DOI:10.1080/23789689.2024.2325261]

El-Maissi, A. M., Argyroudis, S. A., Kassem, M. M., Leong, L. V., & Mohamed Nazri, F. (2022). An Integrated Framework for the Quantification of Road Network Seismic Vulnerability and Accessibility to Critical Services. *Sustainability, 14*(19), 12474. [DOI:10.3390/su141912474]

Elo, S., & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of Advanced Nursing, 62*(1), 107-115. [DOI:10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x] [PMID]

Frigerio, I., Ventura, S., Strigaro, D., Mattavelli, M., De Amicis, M., & Mugnano, S., et al. (2016). A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy. *Applied Geography, 74,* 12-22. [DOI:10.1016/j.apgeog.2016.06.014]

Hayati, S., Ghorbani, A., Esmaeili, A., & Ghanbari, M. (2015). [*Studying the vulnerability of Iranian cities during earthquakes (example: Mashhad city)* (Persian). Paper presented at International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Infrastructure. [Link]

Hung, H. C., Lin, Y. C., Hung, C. H., & Chen, B. H. (2024). Enhancing resilience in ageing: The role of age-friendly community and individual health in reducing seismic risk. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 111,* 104733. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2024.104733]

Kärrholm, M., Nylund, K., & Prieto de la Fuente, P. (2014). Spatial resilience and urban planning: Addressing the interdependence of urban retail areas. *Cities, 36*(36), 121-130. [DOI:10.1016/j.cities.2012.10.012]

Kilanitis, I., & Sextos, A. (2019). Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas. *Bulletin of Earthquake Engineering, 17*(1), 181-210. [DOI:10.1007/s10518-018-0457-y]

Kim, K., Luna-Navarro, A., Ciurlanti, J., & Bianchi, S. (2024). A multi-criteria decision support framework for designing seismic and thermal resilient facades. *Architecture, Structures and Construction, 4,* 195-210. [DOI:10.1007/s44150-024-00116-0]

Klein, R. J. T., Nicholls, R. J., & Thomalla, F. (2003). Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 5*(1), 35-45. [DOI:10.1016/j.hazards.2004.02.001]

Maroufi, H., & Borhani, M. (2022). A measurement of community seismic resilience in sub-city districts of Mashhad, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management, 65*(4), 675-702. [DOI:10.1080/09640568.2021.1902790]

Martins, V. N., e Silva, D. S., & Cabral, P. (2012). Social vulnerability assessment to seismic risk using multicriteria analysis: The case study of Vila Franca do Campo (São Miguel Island, Azores, Portugal). *Natural Hazards, 62*(2), 385-404. [DOI:10.1007/s11069-012-0084-x]

Mitchell, T., & Harris, K. (2012). *Resilience: A risk management approach*. London: Overseas Development Institute. [Link]

Moghaddas, N., Leo, C., Rahimi, B., & Azadi, A. (2018). Morphotectonics and Geoelectrical method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain, Northeast of Iran. *Geopersia, 8*(1), 13-26. [DOI:10.22059/geope.2017.230489.648312]

Niazi, M., Raissi Dehkordi, M., Eghbali, M., & Samadian, D. (2021). Seismic resilience index evaluation for healthcare facilities: A case study of hospital in Tehran. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 65*, 102639. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2021.102639]

Oi□te, A. M., & Breabăn, I. G. (2012). Analysis of relief Iasi city and urban environment quality, using GIS techniques. *Lucrări Ştiinţifice, 55*, 243-248. [Link]

Osborne, J. W., & Overbay, A. (2004). The power of outliers (and why researchers should ALWAYS check for them). *Practical Assessment, Research, and Evaluation, 9*(6), 6. [DOI:10.7275/qf69-7k43]

Peyravi, H., Razavi Nejad, M., Ghanbari, M., Jajromi, H., Emami, M., & Parsae, M., et al. (2020). [*Atlas of neighborhoods of Mashhad city* (Persian)]. Mashhad: Boye-Shahre-Behesht. [Link]

Pitilakis, K., Argyroudis, S., Kakderi, K., & Selva, J. (2016). Systemic Vulnerability and Risk Assessment of Transportation Systems Under Natural Hazards Towards More Resilient and Robust Infrastructures. *Transportation Research Procedia, 14*, 1335-1344. [DOI:10.1016/j.trpro.2016.05.206]

Proag, V. (2014). The Concept of Vulnerability and Resilience. *Procedia Economics and Finance, 18*, 369-376. [DOI:10.1016/S2212-5671(14)00952-6]

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. [DOI:10.1080/1365881031000114071]

Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G., & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 14*(4), 470-486. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2015.09.013]

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology, 15*(3), 234-281. [DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5]

Shad, R., Etemadfard, H., & Ghaemi, M. (2019). [*Spatial assessment of high-rise buildings in Mashhad city using multi-scale 3D modeling in GIS* (Persian)]. Paper presented at: The 5National Conference of Modern Construction Technologies High Rise Building, Mashhad, Iran, 7 March, 2019. [Link]

Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60*, 1654-1677. [DOI:10.1016/j.rser.2016.03.028]

Sinha, N., Priyanka, N., & Joshi, P. K. (2016). Using Spatial Multi-Criteria Analysis and Ranking Tool (SMART) in earthquake risk assessment: A case study of Delhi region, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7*(2), 680-701. [DOI:10.1080/19475705.2014.945100]

Sutley, E. J., van de Lindt, J. W., & Peek, L. (2017). Community-Level Framework for Seismic Resilience. I: Coupling Socioeconomic Characteristics and Engineering Building Systems. *Natural Hazards Review, 18*(3), 04016014. [DOI:10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000239]

Tasmen, T., Sen, M. K., Hossain, N. U. I., & Kabir, G. (2023). Modelling and assessing seismic resilience of critical housing infrastructure system by using dynamic Bayesian approach. *Journal of Cleaner Production, 428*, 139349. [DOI:10.1016/j.jclepro.2023.139349]

Walker, B. B., Taylor-Noonan, C., Tabbernor, A., McKinnon, T. B., Bal, H., & Bradley, D., et al. (2014). A multi-criteria evaluation model of earthquake vulnerability in Victoria, British Columbia. *Natural Hazards, 74*(2), 1209-1222. [DOI:10.1007/s11069-014-1240-2]

Zhao, Y., Yang, X., Zhai, C., & Wen, W. (2023). Exploring relationships of urban seismic resilience assessment indicators with a fuzzy total interpretive structural model method. *Engineering, Construction and Architectural Management, 30*(8), 3509-3538. [DOI:10.1108/ECAM-09-2021-0806]