Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2026, Vol. 16 (1): 1 - 29

Research Article

Zoning Vulnerability of Urban Infrastructure in District 3 of Ahvaz, Emphasizing Environmental and Geological Hazards

Seyd Jafar Hejazi[1]*, Forough Gashtil[2]

1- Department of Architecture, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Literature and Humanities, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

Due to its unique geographical location, geomorphological conditions, proximity to the Karun River, and rapid urban development, the city of Ahvaz has always been exposed to a diverse range of environmental and geohazards. The occurrence of periodic floods, land subsidence, dust storms, industrial pollution, high groundwater levels, and geological vulnerability has threatened the safety of urban infrastructure. The present study was conducted to microzone the vulnerability of urban infrastructure in District 3 of Ahvaz to these environmental and geohazards. This applied, descriptive-analytical study is based on spatial modeling in a GIS environment. In this regard, 562 urban infrastructure units were identified across four main categories: critical infrastructure, emergency services, public-civilian infrastructure, and managerial infrastructure. Additionally, 14 effective layers-including flood risk, distance from the Karun River, industrial density, groundwater level, drainage network, soil type, incompatible land uses, medical centers, arterial roads, population density, green spaces, and sensitive urban centers-were extracted and analyzed. The combined AHP-Fuzzy model was utilized to weight the criteria, and the Fuzzy Overlay tool in ArcGIS was used to integrate the layers. The results indicate that a significant portion of the infrastructure in District 3 of Ahvaz is located in high- and very-high-vulnerability zones. The concentration of sensitive infrastructure near flood paths and industrial land uses, as well as in areas with unsuitable geomorphological conditions, has increased the likelihood of environmental crises and urban disruptions. The findings reveal that approximately 50% of the district's infrastructure is highly vulnerable, and more than half of the district's area is exposed to high hazard levels. Therefore, observing passive defense principles, managing environmental risks, and accounting for geomorphological limitations are essential for urban development planning in Ahvaz. Overall, by providing practical micro-zonation maps, this research provides an operational framework for optimal infrastructure site selection, prioritization of retrofitting measures, comprehensive crisis management scenario design, and the development of local passive defense regulations in District 3 of Ahvaz.

Keywords: *Environmental hazards, Geogenic hazards, Urban vulnerability, Micro-zoning, GIS, Passive defense*

* Corresponding author: hejazi_J@scu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.52333.2572
Received: 2026-06-08
Accepted: 2026-08-19

1- Introduction

With increasing urbanization, it is predicted that by 2050, approximately 80% of the world's population will live in urban areas (Chen, 2021). Cities are the primary settings in which crises occur, and identifying, planning, and appropriately designing urban spaces are essential for prevention, response, and post-crisis recovery (Ceferino et al., 2020; Faturechi and Miller-Hooks, 2023; Eriksson, 2023). Urban spaces should provide multiple options for risk reduction.

Earthquakes are among the most destructive natural hazards, and the first step in crisis management is to identify levels of vulnerability (Samadi et al., 2024). The current era can be characterized by increasing urban vulnerability, which exposes settlements to natural, technological, and socio-security challenges simultaneously (La Rosa and Martinico, 2013). Reducing vulnerability requires an understanding of socio-spatial differences (Li et al., 2014), while optimal land-use planning is a key tool for risk assessment (Pan and Wei, 2015; Pasman and Reniers, 2014).

Microzonation studies play a strategic role in predicting the local effects of geology, topography, and seismic instabilities (Fabozzi et al., 2020) and help to safely locate critical facilities and improve design standards (Patel et al., 2026). Assessing the vulnerability of structures and infrastructure is essential for protecting national assets (Zona et al., 2025).

At the city level, Ahvaz has a high potential for geological hazards due to its location on the Karun alluvial plain and its proximity to active faults and anticlines, such as the Ahvaz and Haftkel structures. Its physical development has often occurred without sufficient consideration of geomorphological constraints (Amanpour et al., 2020). Criteria such as soil texture, slope, elevation, groundwater level, and drainage are key factors in determining suitable areas for urban development (Ameri, 2024). The Ahvaz Fault, which is over 100 km long, is considered capable of generating earthquakes with magnitudes greater than 7, and its associated seismic risk exceeds the thresholds defined by Code 2800; phenomena such as land subsidence are also of concern (Rahmani et al., 2022). Vulnerability reflects the degree to which a system is susceptible to harm and its capacity to anticipate, cope with, and recover from hazardous events (Mahmoudzadeh et al., 2020).

The Ahvaz metropolis is among the vulnerable urban areas in the country due to its location on an alluvial plain, the presence of the Karun River, an arid climate, heavy industrial activities, and high population density. Its loose geological materials, gentle topographic gradients, and inadequate drainage exacerbate the risks of flooding, subsidence, and infrastructure damage. To what extent is District 3 of Ahvaz Municipality, as a densely populated urban area, vulnerable to environmental and geophysical hazards, particularly seismic and structural hazards, and how is this vulnerability spatially distributed across its infrastructure? This study aims to assess and microzone the vulnerability of urban infrastructure in District 3 of Ahvaz, with an emphasis on environmental and geophysical hazards, using spatial decision-making models to identify critical zones and support urban resilience and sustainable development.

2- Material and methods

This study is applied-developmental in nature and employs a descriptive-analytical methodology based on a combination of library research, field surveys, and spatial modeling. The required data were collected through a comprehensive assessment of infrastructure within District 3 of Ahvaz, which provided the basis for developing a spatial database. To achieve the research objectives, 562 infrastructure items were identified through library research and expert surveys and categorized into four groups:

1. **Special Infrastructure (Vital, Sensitive, and Important):** Including telecommunications, power supply systems, oil and gas storage and transportation facilities, banking and financial facilities, and communication terminals and stations.
2. **Emergency Services Infrastructure:** Including hospitals and medical centers, police stations and military garrisons, fire stations, rescue centers, and crisis management bases.
3. **Public-Civil Infrastructure:** Including hotels and guesthouses, parks, religious sites, schools and training centers, and higher education institutions.
4. **Managerial Infrastructure:** Including the Municipality, Crisis Management Headquarters, and the departments responsible for gas, water, electricity, and telecommunications.

To assess proximity patterns, 14 layers representing environmental and geohazard factors affecting the vulnerability of urban infrastructure in District 3 were identified. These layers included flood risk, distance from the Karun River, industrial density, groundwater level, drainage networks, soil type, incompatible land uses, medical centers, arterial roads, population density, green spaces, and sensitive urban centers. Distances associated with each layer were calculated using the Distance tool in GIS. Subsequently, the layers were weighted using a hybrid AHP-Fuzzy-GIS analytical approach. The resulting distance maps were then standardized using the Fuzzy Membership tool. Finally, the Fuzzy Overlay tool in the Spatial Analyst toolbox of ArcGIS was used to microzone safety buffers and assess the vulnerability of urban infrastructure.

3- Results and discussions

3.1. Step 1: Assessing Proximity Patterns in Urban Infrastructure

The first step in assessing the vulnerability of urban infrastructure in District 3 of Ahvaz involved evaluating proximity patterns. To this end, 14 influential layers—including warehouses, cultural and historical sites, administrative and residential centers, industrial zones, law enforcement stations, arterial roads, healthcare facilities, commercial hubs, municipal utilities, educational centers, green spaces, and religious sites—were analyzed. Using the Distance tool in ArcGIS, proximity buffers were generated for each layer. This process resulted in 56 specific maps representing the spatial relationships between hazard-related factors and infrastructure categories. Although multiple spatial outputs were generated, this study focuses on the integrated vulnerability of special-use infrastructure as a primary baseline.

3.2. Step 2: Standardization of Criterion Layers via Fuzzy Membership

Because the distance maps used different units and scales, Fuzzy Membership standardization was applied to ensure consistency and flexibility in the analysis. All values were transformed into a continuous scale ranging from 0 to 1, where 0 represents the highest level of compliance with proximity safety principles, and 1 indicates the highest degree of non-compliance and vulnerability. For this standardization, various fuzzy functions, such as “Small” and “Linear,” were assigned to the 14 layers based on their specific influence on the four infrastructure categories. For example, sensitive sites such as warehouses and industrial zones were assigned specific safety buffers (e.g., 500 m) to reflect their potential risk levels.

3.3. Step 3: Generating Fuzzy Factor Maps through FAHP-GIS

To determine the relative importance of each criterion, a Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) was employed. Expert opinions were utilized to conduct pairwise comparisons between the 14 environmental and geohazard factors. This step was crucial in quantifying how each factor contributes to the vulnerability of the 562 identified infrastructure points. By calculating the degree of importance using specialized statistical relations and applying these weights to the standardized distance maps, 56 fuzzy factor maps were produced. These maps provide a weighted spatial representation of risk, adjusted by the significance of each land-use type from a passive defense perspective.

3.4. Step 4: Integration of Factor Maps for Infrastructure Categories

Following the weighting process, the fuzzy factor maps were integrated using Map Algebra and the Raster Calculator. This integration allowed for the creation of composite vulnerability maps for each of the four main infrastructure categories. The resulting raster layers represent the suitability—or lack thereof—of the current infrastructure distribution in District 3 of Ahvaz. These maps highlight the areas where the concentration of vital services overlaps with high-risk environmental zones, providing a preliminary spatial understanding of urban vulnerability.

3.5. Step 5: Fuzzy Overlay and Final Micro-zoning of Safety Buffers

The final stage of the methodology involved synthesizing all previous findings into a single, comprehensive output. Utilizing the Fuzzy Overlay tool with a Gamma operator (0.9), the weighted layers were merged to produce the final micro-zoning map. As shown in Figure 1, this map illustrates the final micro-zoning of safety buffers and urban infrastructure vulnerability in District 3 of Ahvaz. The analysis classifies the area into five distinct vulnerability levels: Very High, High, Moderate, Low, and Very Low. This final spatial

model allows for the precise identification of vulnerable assets within hazardous zones, offering a critical decision-support tool for urban managers to enhance the city's resilience and passive defense strategies.

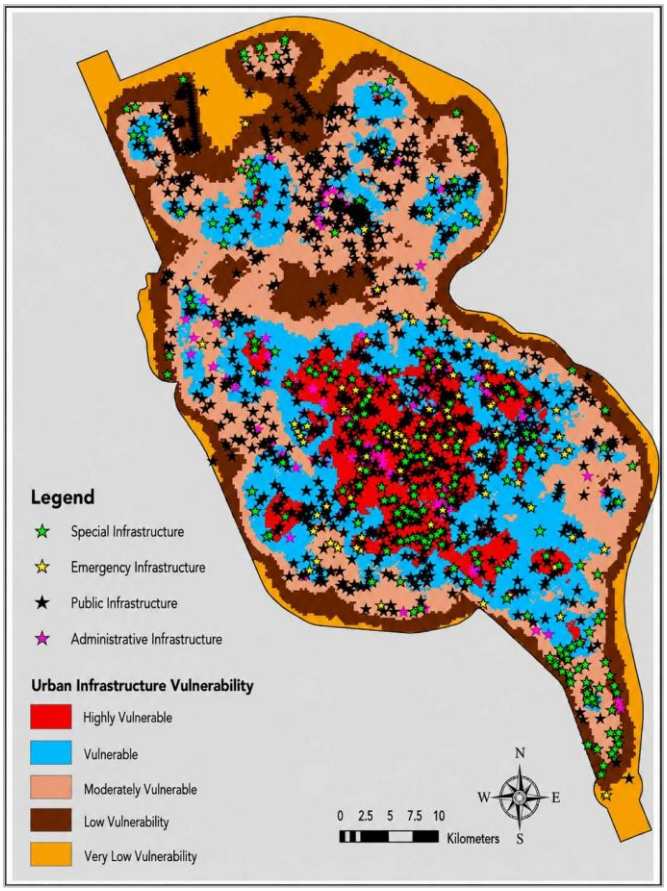


Fig. 1: Micro-zoning of Safety Buffers and Urban Infrastructure Vulnerability in District 3 of Ahvaz

4. Conclusion

Vulnerability in the urban environment signifies an inherent susceptibility to harm driven by physical, biological, and design characteristics. This study analyzed District 3 of Ahvaz using a combined AHP-Fuzzy-GIS model to microzone infrastructure vulnerability, ranging from highly vulnerable to low-risk zones. Thematic results indicate that, for special-use infrastructure, law enforcement facilities have the highest significance (0.099), while healthcare centers (0.103) are the most critical in the emergency services category. For the public-civil and managerial sectors, industrial zones and commercial centers were identified as the primary drivers of vulnerability. Spatially, the findings indicate that approximately 29.73% of the district's total area is classified as highly vulnerable, while only 6.85% has a very low vulnerability status. Specifically, 47.89% of special-use, 54.95% of emergency, 50.33% of public-civil, and 45.55% of managerial infrastructure are located in high-risk zones. This spatial distribution is largely influenced by environmental stressors such as proximity to the flood-prone Karun River, inefficient drainage, and land-subsidence risks associated with high groundwater levels and alluvial soils. Consequently, the central and southern sectors-characterized by high population density and sensitive assets-face the greatest risk, with healthcare and emergency services exhibiting the highest vulnerability levels. Ultimately, the geomorphological fragility of Ahvaz, coupled with uneven urban expansion, has placed more than half of its urban infrastructure in high-risk conditions. To mitigate potential environmental crises, future urban planning should align with the region's geomorphological capacity, prioritizing the relocation or protection of sensitive infrastructure from floodplains and other high-risk zones. Adopting resilient development strategies is essential to ensuring a safer and more sustainable urban future for Ahvaz.

5-References

Amanpour, S., Alizadeh, M., Damanbagh, S., 2020. Identifying and Analyzing the Pattern of Development of Ahvaz City in the Period 1981- 2021. Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies (JSURDS), 1(1), 77-96. (In Persian). https://www.srds.ir/article_122922.html?lang=en

Ameri, M., 2024. Identification and prioritization of natural criteria for zoning areas prone to physical development in Ahvaz city. Geography and Human Relationships 7(1), 782-806. https://doi: 10.22034/gahr.2024.449494.2076.

Ceferino, L., Mitrani-Reiser, J., Kiremidjian, A., Deierlein, G., Bambarén, C., 2020. Effective plans for hospital system response to earthquake emergencies. Nature Communications 11(1), 1–12. https://www.nature.com/articles/s41467-020-18072-w

Chen, T.L., Lin, Z.H., 2021. Impact of land use types on the spatial heterogeneity of extreme heat environments in a metropolitan area. Sustainable Cities and Society 72, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103005

Eriksson, K., 2023. Organisational learning without fire? Risk analyses as a basis for developing crisis management capabilities. Safety Science, 163, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106144

Fabozzi, S., Porchia, A., Fierro, T., Peronace, E., Pagliaroli, A., Moscatelli, M., 2020. Seismic compression susceptibility in dry loose sandy and silty soil in a seismic microzonation perspective. Engineering Geology, 264, 105324. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105324

Faturechi, R., Miller-Hooks, E., 2015. Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: a comprehensive review. Journal of Infrastructure Systems, 21(1), 1–13. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000212

La Rosa, D., Martinico, F., 2013. Assessment of hazards and risks for landscape protection planning in Sicily. Journal of Environmental Management 127, S155–S167. https://doi.org/ 10.1016/ j. jenvman. 2013. 05. 015.

Li, D., Zhang, C., Pizzol, L., Critto, A., Zhang, H., Lv, S., Marcomini, A., 2014. Regional risk assessment approaches to land planning for industrially polluted areas in China: The Hulunbuir region case study. Environment International, 65, 16–32. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.004

Mahmoudzadeh, H., PouyanJam, A. and AsagharZadeh, S. 2020. Spatial Analysis of the Protected Zone and Vulnerability of Urban Facilities in Mashhad to Useful Airstrikes, from a Passive Security Viewpoint. Journal of Geography and Environmental Hazards, 8(4), 191-203. (In Persian). https://doi: 10.22067/ geo. v0i0. 82738

Pasman, H., Reniers, G., 2014. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 28, 2–9. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.004

Patel, N., Singh, V. P., Ahamad, M. N., 2026. Seismic microzonation: a comprehensive summary of principles, practices and case studies of Indian cities. Indian Geotechnical Journal, 56(5), 2601–2642. https://doi.org/10.1007/s40098-025-01298-0

Rahmani, G., Chitsazan, M. and Ghafouri, H. 2022. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models. Advanced Applied Geology, 12(2), 259-275. (In Persian). https://doi: 10.22055/aag.2021.36217.2190.

Samadi, A., Shahmari Ardjani, R., Pourshikhian, A., Hosnimehr, S. S., and Asghari, H. 2024. Assessing the level of vulnerability of urban areas against the earthquake crisis using weighted overlap technique and RADIUS model (case study: Ardabil city). Geography and Planning, 28(90), 323-348. (In Persian). https://doi.org/10.22034/gp.2024.58990.3198

Zona, R., Imani, H., Losco, S., Modano, M., Minutolo, V., 2025. Fast evaluation of seismic vulnerability of RC building: a proposal of micro-zoning procedure for safety assessment. Natural Hazards, 1–19. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-025-07729-8

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Hejazi, J., Gashtil, F., 2026. Zoning Vulnerability of Urban Infrastructure in District 3 of Ahvaz, Emphasizing Environmental and Geological Hazards. Adv. Appl. Geol. 16 (2), 1-29.
DOI: 10.22055/aag.2026.52333.2572
https://aag.scu.ac.ir/article_20818.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

مقاله پژوهشی

ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز با تأکید بر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد

سیدجعفر حجازی

گروه معماری، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

فروغ گشتیل

گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

hejazi_J@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۸

چکیده

شهر اهواز به دلیل موقعیت جغرافیایی، شرایط ژئومورفولوژیکی، مجاورت با کارون و توسعه شهری، همواره در معرض مخاطرات محیطی و زمین‌زاد قرار دارد. وقوع سیلاب، فرونشست، گردوغبار، آلودگی صنعتی، بالا بودن آب‌های زیرزمینی و ساختار زمین‌شناختی، ایمنی زیرساخت‌های شهری را به مخاطره انداخته است. پژوهش حاضر با هدف ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز در برابر این مخاطرات انجام شد. روش مطالعه کاربردی و توصیفی-تحلیلی مبتنی بر مدل‌سازی مکانی در محیط GIS است. در این راستا، ۵۶۲ زیرساخت شهری در ۴ گروه حیاتی، خدمات اضطراری، عمومی و مدیریتی شناسایی شدند. همچنین ۱۴ لایه مؤثر شامل خطر سیلاب، فاصله از کارون، تراکم صنعتی، سطح آب زیرزمینی، شبکه زهکشی، نوع خاک، کاربری‌های ناسازگار، مراکز درمانی، راه‌های شریانی، تراکم جمعیت، فضای سبز و مراکز حساس تحلیل گردید. برای وزن‌دهی معیارها از مدل AHP-Fuzzy و جهت تلفیق لایه‌ها از ابزار Fuzzy Overlay در ArcGIS استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد بخش زیادی از زیرساخت‌های منطقه ۳ اهواز در پهنه‌های با آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد قرار دارند. تمرکز زیرساخت‌های حساس در مجاورت مسیرهای سیلابی، کاربری‌های صنعتی و اراضی نامناسب، احتمال بروز بحران و اختلال شهری را افزایش داده است. یافته‌ها نشان می‌دهد حدود ۵۰ درصد زیرساخت‌های منطقه کاملاً آسیب‌پذیر بوده و بیش از نیمی از مساحت منطقه در معرض مخاطرات بالا قرار دارد. بنابراین، رعایت اصول پدافند غیرعامل و مدیریت مخاطرات در توسعه شهری ضروری است. این پژوهش با ارائه نقشه‌های کاربردی ریزپهنه‌بندی، چارچوبی کاملاً عملیاتی برای مکان‌گزینی بهینه، اولویت‌بندی مقاوم‌سازی، مدیریت جامع بحران و تدوین ضوابط پدافند غیرعامل در منطقه ۳ اهواز فراهم می‌سازد.

واژه های کلیدی: *مخاطرات محیطی، مخاطرات زمین‌زاد، آسیب‌پذیری شهری، ریزپهنه‌بندی، شهر اهواز*

۱- مقدمه

امروزه با روند فزاینده شهرنشینی، بخش عمده‌ای از جمعیت جهان در مناطق شهری سکونت دارند؛ به‌گونه‌ای که پیش‌بینی‌های سازمان ملل حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰ حدود ۸۰ درصد از جمعیت جهان در این مناطق زندگی خواهند کرد (Chen, 2021). در این راستا، شهرها به عنوان بستر اصلی وقوع حوادث و بحران‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. شناخت فضاهای شهری، برنامه‌ریزی و طراحی مناسب آن‌ها، راهی اساسی به‌سوی برآوردن نیازهای شهروندان در سه بعد پیشگیری، مقابله و اقدامات پس از بحران محسوب می‌گردد (Ceferino et al., 2020; Faturechi and Miller-Hooks, 2023). بنابراین، بررسی وضعیت موجود در ابعاد گوناگون و توجه به اصل «شناخت»، گام نخست در مواجهه با بحران‌هاست (Eriksson, 2023). برنامه‌ریزی و طراحی شهری باید به گونه‌ای باشد که فضاهای شهری گزینه‌های متعددی را در هر زمان جهت مقابله، کاهش خطرپذیری و به حداقل رساندن اثرات بحران ارائه دهند (Cremen et al., 2022)، و در این راستا در میان حوادث گوناگون، زلزله به‌عنوان یکی از فاجعه‌بارترین و مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، با تخریب ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری، خسارت‌های گسترده‌ای به دارایی‌ها وارد کرده و تلفات انسانی بسیاری به همراه دارد. ازاین‌رو، نخستین و اساسی‌ترین مرحله در مدیریت بحران جهت کاهش اثرات زلزله، شناسایی سطوح

آسیب‌پذیر در برابر این پدیده است (Samadi et al., 2024). قرار گرفتن اکثر شهرها در معرض مخاطرات بالقوه طبیعی، توجه برنامه‌ریزان و دولت‌ها را به موضوع آسیب‌پذیری و مدیریت آن جلب نموده است (Zhao and Liu, 2016). عصر حاضر را می‌توان عصر آسیب‌پذیری شهری دانست؛ چراکه همسو با پیچیده شدن حیات شهری، سکونتگاه‌ها از یک‌سو با مخاطرات طبیعی و بحران‌های تکنولوژیک و از سوی دیگر با چالش‌های اجتماعی-امنیتی مواجه‌اند (La Rosa and Martinico, 2013: 156). کاهش آسیب‌پذیری مستلزم شناخت تفاوت‌های اجتماعی-فضایی جوامع است، زیرا مخاطرات به‌خودی‌خود به نتایج زیان‌بار منتهی نمی‌شوند، بلکه نشان‌دهنده بسترها و زمینه‌های مستعد بروز آسیب هستند (Li et al., 2014)، از این رو برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه کاربری زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها در فرآیند توسعه شهری، جایگاهی حیاتی در تحقق مخاطره‌نگری دارد (Pan and Wei, 2015) و به پیشگیری و کاهش پیامد فجایع یاری می‌رساند (Pasman and Reniers, 2014). در این میان، مطالعات ریزپهنه‌بندی (Microzonation) نقش استراتژیکی در برنامه‌ریزی کاربری زمین ایفا می‌کنند. در مقیاس شهری، این مطالعات برای پیش‌بینی توزیع فضایی اثرات تقویت موضعی چینه‌شناسی، توپوگرافی و ناپایداری‌های لرزه‌ای مانند روانگرایی یا رانش زمین ضروری هستند (Fabozzi et al., 2020). ریزپهنه‌بندی خطر لرزه‌ای با ارائه ارزیابی دقیقی از خطرات، به مهندسان و برنامه‌ریزان در مکان‌یابی ایمن کاربری‌های حیاتی نظیر مدارس، بیمارستان‌ها، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌ها کمک شایانی کرده و استانداردهای طراحی سازه‌ها را ارتقا می‌بخشد (Patel et al., 2026). افزون بر این، مدیریت ریسک مؤثر مستلزم دانش جامع از آسیب‌پذیری سازه‌ها و ظرفیت آن‌ها برای واکنش فوری است (Zona et al., 2025). ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، به‌ویژه در بافت‌ها و سکونتگاه‌های حساس، برای صیانت از سرمایه‌های ملی و اجتماعی یک ضرورت حیاتی به شمار می‌رود (Zona et al., 2025)، به‌گونه‌ای که در سطح ملی، شهر اهواز به دلیل واقع شدن در بخش جلگه‌ای خوزستان، استقرار بر روی دشت آبرفتی کارون و مجاورت با گسل‌ها و تاقدیس‌های فعال (مانند تاقدیس اهواز و هفتکل) ، پتانسیل بالایی از منظر مخاطرات زمین‌زاد دارد. مطالعات شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی بیانگر فعالیت بالای زمین‌ساختی در این ناحیه است. با این وجود، توسعه فیزیکی اهواز در دهه‌های اخیر غالباً بدون توجه کافی به محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی صورت گرفته است (Amanpour et al., 2020). معیارهایی نظیر بافت خاک، شیب، ارتفاع، سطح آب‌های زیرزمینی و شبکه زهکشی از عوامل کلیدی در تعیین پهنه‌های مستعد توسعه هستند (Ameri, 2024). تحقیقات زمین‌شناسی نشان می‌دهند که گسل اهواز با طول بیش از ۱۰۰ کیلومتر، پتانسیل تولید زمین‌لرزه‌ای با بزرگای بالاتر از ۷ را داشته و خطر لرزه‌ای آن فراتر از مقادیر مندرج در آیین‌نامه ۲۸۰۰ است. همچنین پدیده‌هایی نظیر افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست (Rahmani et al., 2022) و چالش‌های زیست‌محیطی، لزوم به‌روزرسانی زیرساخت‌های شهری را دوچندان کرده است، در همین راستا آسیب‌پذیری به‌طوری کلی بیانگر احتمال وقوع یک رخداد و ویژگی‌های یک سیستم است که ظرفیت آن را در پیش‌بینی، مقابله و بازتوانی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mahmoudzadeh et al., 2020). کلان‌شهر اهواز به‌واسطه قرارگیری در دشت آبرفتی، مجاورت با رودخانه کارون، شرایط اقلیمی خشک، استقرار صنایع سنگین (نفت، گاز و فولاد) و تمرکز بالای جمعیت، یکی از آسیب‌پذیرترین شهرهای کشور در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد است. ساختار زمین‌شناختی سست، شیب بسیار کم زمین و ضعف زهکشی طبیعی، احتمال بحران‌هایی نظیر آب‌گرفتگی، نشست و آسیب به زیرساخت‌ها را تشدید کرده است، و در نهایت با توجه به مطالب ذکرشده، مسئله اصلی این است که منطقه ۳ شهرداری اهواز به عنوان یکی از مناطق مهم و متراکم شهری، تا چه میزان در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد (به‌ویژه خطرات لرزه‌ای و ساختاری) آسیب‌پذیر است و توزیع فضایی این آسیب‌پذیری‌ها در سطح زیرساخت‌های شهری چگونه است؟ عدم شناخت دقیق این پهنه‌ها می‌تواند در زمان وقوع بحران، اختلالات جبران‌ناپذیری در عملکرد شهر ایجاد کند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف تحلیل و ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری

منطقه ۳ اهواز با تأکید بر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد انجام می‌گیرد تا با بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری مکانی، ضمن شناسایی پهنه‌های بحرانی، گامی مؤثر در جهت ارتقای تاب‌آوری شهری و توسعه پایدار برداشته شود.

۲- مبانی نظری

از زمان پیدایش بشر روی کره خاکی، انسان همواره شاهد مخاطرات و بلایای گوناگون در پیرامون زندگی خود بوده و در تلاش مداوم برای غلبه بر این مخاطرات و به حداقل رسانیدن آسیب‌های ناشی از آن برآمده است. انسان‌ها در طول تاریخ با روش‌های مختلفی نظیر پناه گرفتن در غارها، ساخت جوشن و سپر، ایجاد برج و بارو و قلاع مرتفع و حفر خندق، تلاش کرده‌اند امنیت گروهی خود را تأمین کنند و از حملات غافلگیرانه پیشگیری نمایند. با این حال، تحولات عمیق معیشتی در دنیای معاصر، انسان را از زندگی ساده گذشته وارد حیات مدرن، پیچیده و متمرکز در قالب «شهرنشینی» کرده است (Aftab et al., 2018). همزمان با پیچیده‌تر شدن کالبد و عملکردهای حیات شهری، شهرها در ابعاد مختلف با طیف وسیعی از بحران‌ها شامل مخاطرات طبیعی (زمین‌لرزه، سیل، زمین‌لغزش)، بحران‌های تکنولوژیک و آسیب‌های امنیتی- اجتماعی مواجه شده‌اند که تاب‌آوری جوامع شهری را به شدت به چالش می‌کشند. در چنین شرایطی، شناخت ابعاد مختلف آسیب‌پذیری و مدیریت ریسک به یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است.

۲-۱-مفهوم‌شناسی آسیب‌پذیری شهری و رویکردهای مدیریت ریسک

آسیب‌پذیری در برابر سوانح، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه که نرخ رشد سریع جمعیت و توسعه فیزیکی کنترل‌نشده را تجربه می‌کنند، به یکی از بحرانی‌ترین چالش‌های مدیریت شهری بدل شده است (Chen, 2021). افزایش شتابان جمعیت شهری و توسعه ساختار کالبدی شهرها در دهه‌های آینده، نشان‌دهنده آن است که پیامدهای فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی بلایای طبیعی می‌تواند ابعاد فاجعه‌باری به خود بگیرد (Samadi et al., 2024).

در مواجهه با این سوانح، به‌طور کلی دو راهبرد اساسی مطرح می‌شود:

-راهبرد پیش‌بینی (Predictive Strategy): که برای آمادگی روبه‌رو شدن با مخاطرات شناخته‌شده و سناریوهای محتمل به کار می‌رود.

-راهبرد تاب‌آوری (Resilience Strategy): که برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و شرایط ناشناخته کاربرد دارد (Heinzlef et al., 2020).

از آنجا که بسیاری از بلایا ذاتاً غیرقابل‌پیش‌بینی هستند، توسعه راهبرد دوم و ارتقای ظرفیت تطبیقی ساکنان و زیرساخت‌ها برای «زندگی در کنار بحران» از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا، شناسایی دقیق نقاط آسیب‌پذیر گامی اساسی برای اولویت‌بندی مداخلات کالبدی است که نیازمند بررسی چندبعدی فاکتورهایی نظیر تراکم جمعیتی و ساختمانی، کیفیت مصالح، فاصله از گسل‌ها و شریان‌های حیاتی، و سازگاری کاربری‌هاست (Deverell et al., 2019).

۲-۳- ابعاد و مؤلفه‌های مخاطرات طبیعی در بستر شهری

الف. مخاطرات لرزه‌ای و آسیب‌پذیری ساختاری

وقوع زمین‌لرزه در یک منطقه، پدیده‌ای پیچیده است که فرآیندهای زمانی- مکانی را در مقیاس‌های گوناگون در بر می‌گیرد (Zhou et al., 2017). تمرکز ساخت‌وسازها در حریم گسل‌ها، ریسک لرزه‌خیزی شهرها را به شدت بالا می‌برد. مطالعات نشان می‌دهند که سهم عمده‌ای از خسارات جانی و مالی بلایا در کشورهای درحال‌توسعه، ناشی از ضعف در ضوابط ساختمانی و استاندارد زیرساخت‌هاست، به‌طوری‌که حدود ۹۵ درصد قربانیان جهانی بلایا به این مناطق تعلق دارند. در واقع ریسک حاصل‌ضرب «خطر» در «آسیب‌پذیری» است؛ و از آنجا که آسیب‌پذیری صورت‌های گوناگونی (جانی، عملکردی، کالبدی، اقتصادی و اجتماعی) دارد، ارزیابی آن مستلزم رهیافتی جامع‌نگر است تا بتواند با تلفیق تخصص‌ها و معیارهای مختلف، ابزاری کارآمد برای کاهش خسارات فراهم کند (Ghazanfar Pour et al., 2023).

ب. مخاطرات ژئومورفولوژیکی (زمین‌لغزش و ناپایداری‌های دامنه‌ای)

زمین‌لغزش یکی از مخرب‌ترین حرکات دامنه‌ای است که به عنوان جابه‌جایی بخشی از توده زمین بر روی سطوح گسیختگی تعریف می‌شود. در مناطق شهریِ مجاور ارتفاعات یا دارای شیب‌های توپوگرافی خاص، این پدیده می‌تواند زیرساخت‌های حیاتی، راه‌های ارتباطی و پهنه‌های مسکونی را به شدت تهدید کند(Li, 2019).

۲-۴- دسته‌بندی مخاطرات محیطی و زمین‌زاد شهری

-مخاطرات محیطی: مخاطرات محیطی به مجموعه‌ای از فرآیندها و پدیده‌هایی اطلاق می‌شود که منشأ طبیعی یا انسانی داشته و سلامت انسان، کیفیت محیط زیست و پایداری زیرساخت‌های شهری را تهدید می‌کنند. در کلان‌شهرهایی نظیر اهواز، این مخاطرات عمدتاً شامل پدیده گردوغبار، آلودگی هوا، سیلاب‌های شهری ناشی از بارندگی‌های رگباری، آلودگی منابع آب، تخریب پوشش گیاهی و جزایر گرمایی شهری است. توسعه بی‌رویه کالبدی و استقرار صنایع سنگین و آلاینده در پیرامون شهرها نیز نقش کاتالیزور را در تشدید این مخاطرات ایفا کرده‌اند (Smith et al., 2023).

-مخاطرات زمین‌زاد (Geogenic Hazards): مخاطرات زمین‌زاد به پدیده‌هایی اطلاق می‌شود که منشأ آن‌ها ویژگی‌های ذاتی زمین، ساختار زمین‌شناسی و فرآیندهای درونی کره زمین است؛ از جمله فرونشست زمین، فرسایش شدید خاک، ناپایداری بستر، بالا بودن سطح آب زیرزمینی (تراز پیزومتریک بالا) و تحولات ژئومورفولوژیکی. به عنوان مثال، ساختار زمین‌شناختی دشت اهواز و گسترش رسوبات آبرفتی جوان و سست، این بستر شهری را در برابر ناپایداری‌های زمین‌زاد و واکنش‌های لرزه‌ای- مکانیکی بسیار آسیب‌پذیر ساخته است (Wang et al., 2021; Sridhar et al., 2026).

در ادامه، جهت تبیین مبانی نظری، شناخت شکاف‌های پژوهشی و مقایسه ابعاد مختلف موضوع، به بررسی پیشینه‌های داخلی و خارجی مرتبط با ارزیابی آسیب‌پذیری و ریزپهنه‌بندی زیرساخت‌های شهری پرداخته شده است.

در مقاله که Samadi و همکاران (۲۰۲۴) با عنوان ارزیابی سطح آسیب‌پذیری مناطق شهری در برابر بحران زلزله با استفاده از تکنیک همپوشانی وزنی و مدل RADIUS در شهر اردبیل انجام شد در این تحقیق برای تجزیه‌وتحلیل اطلاعات از تکنیک AHP در نرم‌افزار Expert Choice، روش Weighted Overlay در نرم‌افزار GIS و مدل تخمین خسارت RADIUS استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با بررسی ۱۵ معیار، معیارهای فاصله از گسل، همجواری با کاربری‌های خطرزا و دسترسی به مراکز خدمات‌رسان بیشترین اهمیت (تأثیر) را جهت ارزیابی آسیب‌پذیری در برابر زلزله داشته‌اند. همچنین با توجه به ارزش‌گذاری معیارهای مورد بررسی و تلفیق آن در روش همپوشانی فازی مشخص گردید که حدود ۱۳ درصد از بافت شهر اردبیل در پهنه‌ی آسیب‌پذیری خیلی‌زیاد و حدود ۱۸ درصد در پهنه‌ی آسیب‌پذیری زیاد قرار دارند. از طرفی نتایج مدل RADIUS نشان می‌دهد که تعداد ۱۳۸۵۳ ساختمان در معرض تخریب قرار دارند که ۳۶ درصد آن‌ها در منطقه ۱ و ۲۹ درصد آن‌ها در منطقه ۴ می‌باشند. همچنین تعداد مجروحان در زلزله‌ی احتمالی ۶۷۱۱۷ و تعداد کشته‌شدگان ۳۱۱۳ برآورد شده است.

در مقاله که Ghazanfar Pour و همکاران (۲۰۲۳) با عنوان «تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سکونتگاه‌های انسانی شهرستان باشت با استفاده از مدل دیماتل فازی و GIS» انجام داده ند که روش پژوهش شامل استفاده از مدل دیماتل فازی برای وزن‌دهی و نرم‌افزار GIS برای تحلیل‌های مکانی و پهنه‌بندی خطر بوده است. مشخص گردید که از مساحت ۶۴/۱۰۳۷ کیلومترمربع شهرستان باشت، ۸۰/۱۵۰ کیلومترمربع معادل ۵۳/۱۴ درصد در پهنه بدون خطر و ۲۵/۲۸۲ کیلومترمربع معادل ۲۵/۲۷ درصد در پهنه کم‌خطر قرار دارد. ۲۹/۲۷۳ کیلومترمربع معادل ۳۳/۲۶ درصد در پهنه متوسط، ۲۰/۲۳۳ کیلومترمربع معادل ۴۷/۲۲ درصد در پهنه زیاد خطر زلزله و همچنین ۳۲۰/۹۸ کیلومترمربع از کل شهرستان معادل ۴۷/۹ در پهنه بسیار زیاد از خطر زلزله قرار دارد. همچنین نتایج حاصل از خطر زلزله نشان داد که شهر باشت بر روی پهنه با خطر بالای زلزله قرار دارد. تحلیل فضایی میزان آسیب‌پذیری نقاط روستایی و آبادی‌ها نشان می‌دهد که ۳۲/۹۴ درصد از آبادی‌ها و روستاهای شهرستان باشت در پهنه با خطر خیلی بالا، ۲۳/۵۲ درصد در پهنه با خطر زیاد،

۲۸/۸۲ درصد در پهنه با خطر متوسط و ۱۱/۱۷ درصد از سکونتگاه‌های روستایی و آبادی‌ها در پهنه با خطر کم زلزله قرار دارد؛ بنابراین انجام اقدامات لازم ازجمله جلوگیری از استقرار، صدور مجوز و ممانعت از ساخت‌وساز بر روی گسل‌ها، آگاه‌سازی عمومی در راستای اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع حوادث، جلوگیری از استقرار و تمرکز سکونتگاه‌های شهری و روستایی در پهنه‌های با خطر بالا، برقراری سیستم هشدار و اخطارهای به‌موقع در پس‌لرزه‌های قبل از زلزله، دسترسی تمام سکونتگاه‌های شهری و روستایی به راه‌های ارتباطی و مراکز امدادرسان برای دسترسی سریع به مناطق بحرانی پس از وقوع زلزله و ... جهت کاهش آسیب‌های جانی و خسارات مالی ناشی از بحران زلزله در مراکز جمعیتی شهرستان باشت امری ضروری به نظر می‌رسد.

در مقاله که Salahshur و همکاران (۲۰۲۲) با عنوان «ارزیابی میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری با رویکرد پدافند غیرعامل (مطالعه موردی: شهر شیروان)» گردید در این تحقیق از نرم‌افزار ArcGIS جهت پردازش داده‌ها و اطلاعات مکانی و برای وزن‌دهی لایه‌ها بر اساس مدل ANP از نرم‌افزار Super Decision استفاده شده است. مشخص شد که میزان آسیب‌پذیری شهر شیروان در برابر تهدیدات نظامی دشمن در ۶/۱۱ درصد از شهر خیلی کم، ۳/۴۱ درصد میزان آسیب‌پذیری کم، ۹/۲۵ درصد میزان آسیب‌پذیری متوسط، ۲/۱۷ درصد میزان آسیب‌پذیری بالا و ۹/۳ درصد میزان آسیب‌پذیری خیلی بالا بوده که درواقع میزان آسیب‌پذیری شهر شیروان در ۹/۵۲ درصد از شهر پایین و در ۱/۲۱ درصد از شهر میزان آسیب‌پذیری بالا بوده است. در نهایت با توجه به نتایج نهایی پژوهش مشخص شد که تأسیسات حیاتی با میانگین تأثیر ۶/۳ به عنوان مهم‌ترین عناصر شهری آسیب‌پذیر در برابر تهدیدات و اقدامات نظامی دشمن شناسایی شده‌اند.

در مقاله که Majd-bavi (۲۰۲۱) با عنوان «پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در محدوده سد شهید عباسپور» انجام شد که این پژوهش با استفاده از دو روش حائری ـ سمیعی و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام گردید که در آن هفت عامل سنگ‌شناسی، زاویه شیب، طول گسل، طول راه و رودخانه، عامل بارندگی، شدت بارندگی و زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفت. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، بر اساس مقایسات زوجی بین عوامل ذکرشده و نظرات کارشناسان در نرم‌افزار Expert Choice، وزن نهایی عوامل به دست آمد و سپس در محیط نرم‌افزار GIS نقشه‌های پهنه‌بندی ترسیم شدند. مشخص کرد که بیشترین مناطق حساس به لغزش در آبرفت‌های جوان کواترنری قرار دارند و عامل سنگ‌شناسی به عنوان مهم‌ترین عامل در محدوده شناسایی شده است؛ به طور کلی مناطق با خطر زیاد در محدوده جنوب غربی سد و بخش کوچکی در شمال آن واقع شده‌اند.

در مقاله که Mahmoudzadeh و همکاران (۲۰۱۹) با عنوان «مدل‌سازی مکانی حریم ایمنی و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری مشهد در برابر حملات هوایی از منظر پدافند غیرعامل» انجام شد که جهت سنجش الگوی همجواری، ۱۴ لایه مؤثر در آسیب‌پذیری شناسایی شد و با استفاده از تحلیل ترکیبی ANP-DEMATEL-GIS وزن‌دهی شدند. برای کشف روند الگو جهت طبقه‌بندی شاخص‌های کلان از خودهمبستگی فضایی نرم‌افزار GeoDa و برای توزیع فضایی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری در برابر حمله هوایی از ابزار FUZZY OVERLAY در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. مشخص کردند که مراکز بهداشتی و صنایع شهری اثرگذارترین شاخص و انبار و مراکز مذهبی اثرپذیرترین شاخص‌ها شناخته شدند. همچنین روند الگوها نشان می‌دهد بیش‌ترین ضریب شاخص‌های کلان مربوط به زیرساخت‌های ویژه با اهمیت ۵۵/۱ است. نتایج یافته‌های مکانی به‌روشن‌ترین شکل بیان می‌کند بیش از ۶۰ درصد از زیرساخت‌ها در وضعیتی از آسیب‌پذیر تا کاملاً آسیب‌پذیر هستند و فقط ۹۳/۴ درصد یا به عبارتی چیزی حدود ۵ درصد از تمام زیرساخت‌های شهری مشهد وضعیتی ایمن و کم‌خطر دارند.

در مقاله که Aftab و همکاران (۲۰۱۸) با عنوان «ارزیابی آسیب‌پذیری شهر ارومیه با رویکرد پدافند غیرعامل» انجام شد که برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از مدل ANP در رویکردی تلفیقی با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و منطق فازی استفاده شده است. مشخص شد که ۲۷/۴۵ کیلومترمربع معادل ۷۶/۵۵ درصد از کل محدوده

شهر با میزان جمعیت ۵۳۰۶۹۶ نفر که معادل ۵۹/۸۰ درصد از کل جمعیت شهر ارومیه می‌باشد، دارای آسیب‌پذیری متوسط تا خیلی زیاد شناخته‌شده است. بیشتر نواحی شمالی (سکونتگاه‌های غیررسمی منطقه دو) و مرکزی (محلات قدیمی منطقه چهار) شهر ارومیه به علت تراکم بالای جمعیتی و مسکونی و قرارگیری اکثر مراکز اداری-سیاسی، حساس و تجاری در این مناطق، آسیب‌پذیرترین مناطق ارومیه هستند؛ بنابراین، رعایت نکردن اصول همجواری در کاربری‌های حساس و حیاتی و عدم رعایت استاندارد ساخت‌وساز در منطقه چهار و دو بیش از سایر مناطق شهری است. در این میان، معیارهای کاربری‌های حساس و حیاتی، مراکز نظامی و اداری بیشترین تأثیر را در تعیین آسیب‌پذیری شهر ارومیه دارند.

در مقاله که Amanpour و همکاران (۲۰۱۶) با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری کوهدشت با رویکرد پدافند غیرعامل انجام شد. اصول همجواری در بین کاربری‌ها مورد سنجش قرار گرفت و با توجه به اثرگذاری متفاوت شاخص‌ها، از مدل ترکیبیFAHP-GIS برای ارزش‌گذاری و تهیه مدل مکانی استفاده شد؛ در نهایت با نرم‌افزار ArcGIS (ابزار Spatial Analysis) و از طریق توابع همپوشانی فازی (Fuzzy Overlay) رستر نهایی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری تهیه گردید. مشخص گردید که ۶۸ درصد از زیرساخت‌ها با رعایت همجواری ۰/۲۹ تا ۰/۵۵ و میزان آسیب‌پذیری ۰/۴۵ تا ۰/۷۱ در پهنه‌ی آسیب‌پذیری زیادی قرار دارند.

در مقاله Guida و Gargiulo (۲۰۲۶) که با عنوان شهرهای مقاوم در برابر آب و هوا: تمرکز بر شاخص‌های آسیب‌پذیری با روش پژوهش مبتنی بر انجام تجزیه‌وتحلیل کتاب‌سنجی (با استفاده از نرم‌افزارهای VOSviewer و Bibliometrix) بر روی ۳۴۲ مقاله شناسایی‌شده پس از غربالگری اولیه و سپس تجزیه‌وتحلیل عمیق ۱۰۹ مطالعه اصلی برای بررسی متغیرهای تشکیل‌دهنده شاخص‌ها در هشت گروه موضوعی بوده است. مشخص کرد که این دسته‌بندی، شیوه‌های ارزیابی فعلی را برجسته کرده، حوزه‌های کم‌نمایندگی را آشکار می‌سازد و مستقیماً به ساختاردهی یک چارچوب جامع‌تر و یکپارچه‌تر برای ارزیابی آسیب‌پذیری شهری با هدف ارتقای شیوه‌های برنامه‌ریزی شهری کمک می‌کند.

در مقاله Poudel و همکاران (۲۰۲۶) که با عنوان «درک ریسک چندمخاطره‌ای برای شهرهای ساحلی» با روش پژوهش شامل استفاده از یک شاخص ریسک چندمخاطره‌ای با تکیه بر تجزیه‌وتحلیل مشاهدات زمینی در محل، اطلاعات سنجش از دور و مجموعه داده‌های تجزیه‌وتحلیل مجدد برای بررسی تعامل بین خطر، میزان مواجهه و آسیب‌پذیری بوده است. مشخص گردید که در بیست شهر انتخاب‌شده، سطوح ریسک تنوع قابل توجهی از ۴۰ تا ۸۰ دارد؛ به‌طوری‌که شهرهای ساحل خلیج فارس روند ریسک سطح دریا بالاتری را تجربه می‌کنند، شهرهای ساحل غربی مواجهه نسبتاً کمتری نشان می‌دهند، شهرهای شمال شرقی اقیانوس اطلس با آسیب‌پذیری بالاتری روبه‌رو هستند و شهرهای جنوب شرقی اقیانوس اطلس آسیب‌پذیری کمتری دارند. این نمرات ریسک نسبی، چارچوبی را برای برنامه‌ریزان فراهم می‌کند تا استراتژی‌های تاب‌آوری هدفمند را اتخاذ کنند.

در مقاله Roy و همکاران (۲۰۲۶) که با عنوان «ارزیابی کمی ریسک شبکه‌های جاده‌ای در معرض خطرات طبیعی» با روش پژوهش بر اساس یک فرآیند پنج مرحله‌ای شامل جستجوی مقالات با کلمات کلیدی، غربالگری بر اساس عناوین، بررسی و انتخاب مقالات، و تحلیل آن‌ها برای دسته‌بندی بر اساس مؤلفه‌ها، معیارهای عملکرد، روش‌شناسی‌ها، مراحل چرخه عمر، روش‌های شکنندگی، تکنیک‌های پیشرفته ارزیابی ریسک و تأثیرات اجتماعی-اقتصادی انجام شده است. مشخص گردید که مطالعات اخیر عمدتاً بر تکنیک‌های ارزیابی تمرکز دارند (۹۰ درصد بر روش‌شناسی و ۱۰ درصد بر توسعه ابزار) و ۸۵ درصد از مطالعات به استراتژی‌های مقاوم‌سازی، واکنش و بازیابی می‌پردازند؛ همچنین خطرات زلزله و سیل نقاط کانونی اصلی هستند در حالی که خطرات سونامی به‌طور قابل‌توجهی کمیاب‌اند.

در مقاله Zona و همکاران (۲۰۲۵) که با عنوان «ارزیابی سریع آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح: پیشنهادی برای روش ریزپهنه‌بندی برای ارزیابی ایمنی» و روش پژوهش شامل یک رویکرد سیستماتیک

برای طبقه‌بندی سازه‌ها بر اساس خواص هندسی و مکانیکی به مورفو-تایپ‌ها، توسعه نقشه‌های محلی برای شناسایی مناطق یکنواخت، و استفاده از تکنیک ساده‌شده پوش‌آور با روش المان محدود مبتنی بر جابجایی برای تحلیل و تعریف منحنی‌های ظرفیت انجام شده است مشخص کردند که این روش از طریق ابزارهای کاربرپسند مانند نمایش‌های GIS و نقشه‌های خطر موضوعی، منابع عملی مناسبی برای ارزیابی ریسک و مدیریت منطقه‌ای فراهم می‌کند.

در مقاله Naser و Kodur (۲۰۲۵) که با عنوان «آسیب‌پذیری سازه‌ها و زیرساخت‌ها در برابر آتش‌سوزی‌های جنگلی: نگاهی به استراتژی‌های ارزیابی و کاهش اثرات» با روش پژوهش بر اساس بررسی دیدگاه‌ها و استراتژی‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی‌های جنگلی و راهکارهای مقابله با آن انجام شده است. مشخص گردید که می‌توان با تأکید بر ساخت‌وساز مقاوم در برابر آتش، برنامه‌ریزی استراتژیک شهری، آموزش عمومی و استفاده از پیشرفت‌های فناوری، خطر آتش‌سوزی جنگلی را کاهش داد و از محیط‌های ساخته‌شده و جوامع در برابر این تهدید محافظت کرد.

در مقاله Fabozzi و همکاران (۲۰۲۰) که با عنوان «حساسیت فشرده‌سازی لرزه‌ای در خاک خشک، سست شنی و سیلتی از دیدگاه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای» روش پژوهش بر اساس یک رویکرد عددی برای بررسی ناپایداری همزمان لرزه‌ای ناشی از فشردگی لرزه‌ای در ماسه‌های سست خشک، ماسه‌های سیلتی و سیلت‌های ماسه‌ای انجام شده است تا نمودارهای ساده‌شده‌ای برای ارزیابی اثر ناپایداری از نظر نشست‌های ناشی از زلزله ارائه شود و کارایی آن روی مطالعه موردیه دره سانتا کلاریتا در زلزله ۱۹۹۴ نورثریج آزمایش شده است. مشخص گردید که نمودارهای پیشنهادی بر اساس سه کلاس PGA، ضخامت لایه خاک، چگالی نسبی و سرعت موج برشی، ابزار مناسبی برای پیش‌بینی نشست‌ها و جابجایی‌های دائمی خاک و لحاظ شدن در مطالعات ریزپهنه‌بندی فراهم می‌کنند.

بررسی و مقایسه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که هرچند مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، تحلیل مخاطرات زیرساختی با رویکرد پدافند غیرعامل، پایش پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و مدل‌سازی‌های نوین چندمخاطره‌ای انجام گرفته است، اما عمده این پژوهش‌ها با محدودیت‌های ساختاری مهمی همچون تمرکز بر ارزیابی‌های کلی در مقیاس کلان شهری یا شهرستانی، تک‌مخاطره‌ای بودن (پرداختن صرف به زلزله، سیل یا آتش‌سوزی)، و عدم لحاظ همزمان جامعیت عوامل زمین‌زاد و محیطی مواجه بوده‌اند؛ بنابراین، پژوهش‌های پیشین عمدتاً از تحلیل یکپارچه ریسک در مقیاس خرد و ریزپهنه‌بندی تخصصی زیرساخت‌ها غافل بوده‌اند و همین امر، شکاف نظری و تجربی آشکاری را در مطالعات مدیریت بحران ایجاد کرده است. در واقع پژوهش حاضر برای رفع ضعف‌ها و شکاف‌های یادشده، با بهره‌گیری از رویکردی تلفیقی و بومی‌سازی‌شده بر «منطقه ۳ شهرداری اهواز» به عنوان یکی از مناطق حیاتی، متراکم و دارای پیچیدگی‌های صنعتی، زیست‌محیطی و زمین‌شناختی در بستر آبرفتی رودخانه کارون گامی فراتر از مطالعات پیشین برداشته است. جهت تمایز اصلی این پژوهش با سایر مطالعات در این است که برخلاف رویکردهای تک‌مخاطره‌ای یا کلان‌نگر گذشته، این مطالعه با تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری مکانی و داده‌های دقیق مخاطرات زمین‌زاد و محیطی (نظیر لرزه‌خیز بودن گسل منطقه، نوسانات و افت سطح آب زیرزمینی، و چالش‌های ژئومورفولوژیکی)، دست به ریزپهنه‌بندی و ارزیابی یکپارچه آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری در مقیاس خرد زده است تا ابزاری دقیق و عملیاتی برای کاهش ریسک در این کلان‌شهر فراهم کند.

۳- موقعیت محدوده مورد مطالعه

منطقه ۳ شهرداری اهواز در بخش شمال شرقی رودخانه کارون واقع شده است. این منطقه در محدوده جغرافیایی تقریبی عرض‌های شمالی (مثلاً بین ۳۱ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه) و طول‌های شرقی (بین ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۴ دقیقه) جای گرفته است. محدوده این منطقه از شمال به رودخانه کارون (حدفاصل انتهای پارک شهروند تا محدوده شهر)، از جنوب به بلوار قدس (حدفاصل محدوده شهر تا رودخانه کارون)، از شرق به محدوده شهر (حدفاصل نیروگاه زرگان تا بلوار قدس) و از غرب به رودخانه کارون (حدفاصل بلوار قدس تا انتهای پارک شهروند) محدود می‌شود. تعداد ۴ ناحیه و ۲۷ محله

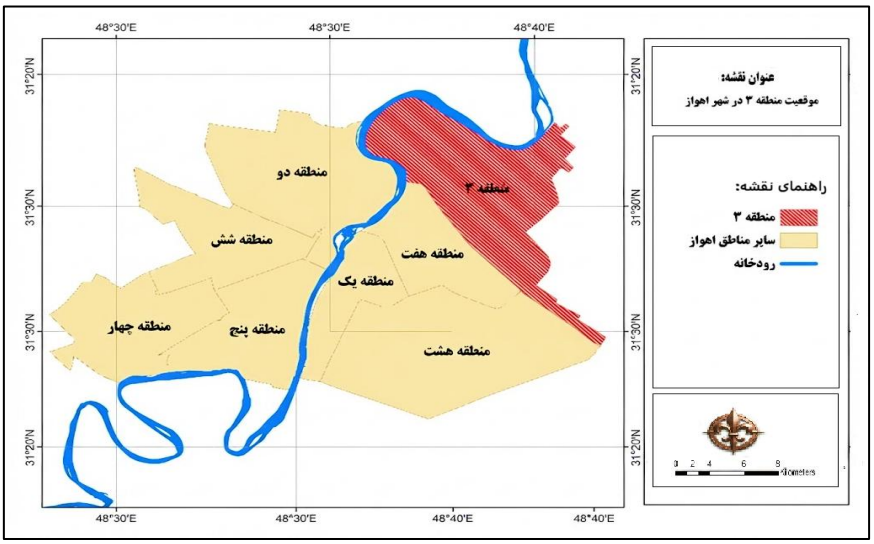
در محدوده خدماتی منطقه ۳ شهرداری کلان‌شهر اهواز قرار دارد که بر اساس آمار سرشماری سال ۱۳۹۵، دارای ۱۸۲,۳۶۳ نفر جمعیت و حدود ۳,۸۹۵.۳ هکتار مساحت می‌باشد. از منظر محیطی و ژئومورفولوژیکی، منطقه ۳ در بخشی از دشت آبرفتی کارون قرار گرفته و به دلیل شیب کم، سطح بالای آب زیرزمینی و ضعف زهکشی، مستعد آب‌گرفتگی و سیلاب شهری است. همچنین نزدیکی برخی بخش‌های منطقه به کاربری‌های صنعتی و محورهای پرترافیک، موجب افزایش آلودگی محیطی و کاهش کیفیت زیست شهری شده است. در جدول ۱ به بررسی اطلاعات توصیفی منطقه ۳ شهرداری اهواز پرداخته شده است.

جدول ۱- اطلاعات توصیفی منطقه ۳ شهرداری اهواز (منبع: معاونت برنامه‌ریزی شهرداری اهواز: ۱۴۰۴)

Table 1- Descriptive information of District 3 of Ahvaz Municipality

نام منطقه	تعداد جمعیت (۱۳۹۵)	مساحت (هکتار)	تعداد ناحیه	تعداد محله
منطقه ۳	۱۸۲۳۶۳	۳۸۹۵/۳	۴	۲۷

اطلاعات مساحتی و شاخص‌های جمعیتی منطقه ۳ شهرداری اهواز (مطابق جدول ۱) نشان می‌دهد که مساحت این منطقه ۳,۸۹۵.۳ هکتار بوده و با اختصاص ۱۱ درصد از مساحت کل شهر اهواز، در رتبه پنجم در بین مناطق شهری قرار دارد؛ همچنین، جمعیت این منطقه معادل ۱۸۲,۳۶۳ نفر است که ۴.۱۵ درصد از جمعیت کل شهر اهواز را شامل شده و این منطقه را در رتبه دوم جمعیتی در میان مناطق شهری اهواز قرار داده است. شکل(۱) موقعیت منطقه ۳ شهرداری اهواز را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه ۳ شهرداری اهواز

Figure 1. Location of District 3 of Ahvaz Municipality

۴- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر به لحاظ ماهیت هدف، توسعه‌ای-کاربردی و از لحاظ روش‌شناسی، توصیفی-تحلیلی است که بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی‌های میدانی و رویکرد مدل‌سازی انجام گرفته است. در همین راستا، با مطالعه جامع پیرامون زیرساخت‌های منطقه ۳ شهر اهواز، اطلاعات مورد نیاز استخراج و بانک داده‌های مکانی تشکیل گردید.۱. مبنای انتخاب و تشریح شاخص‌ها برای دستیابی به اهداف تحقیق و سنجش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد، ۱۴ شاخص و زیرساخت کلیدی در قالب چهار دسته اصلی شامل: ۱) زیرساخت‌های ویژه، ۲) زیرساخت‌های خدمات اضطراری، ۳) زیرساخت‌های عمومی- مردمی و ۴) زیرساخت‌های مدیریتی (در مجموع شامل ۵۶۲ زیرساخت) شناسایی

شدند. مبنای انتخاب این شاخص‌ها، مرور ادبیات تخصصی پدافند غیرعامل، مطالعات پیشین ارزیابی آسیب‌پذیری شهری و نظرسنجی از خبرگان و متخصصان مدیریت بحران و برنامه‌ریزی شهری بوده است که تناسب مستقیمی با شرایط کالبدی و محیطی منطقه ۳ اهواز دارند. در جدول ۲ به لیستی از فهرست زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز آورده شده است.

جدول ۲- فهرست زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز(ماخذ، نگارندگان،۱۴۰۵)
Table 2- List of urban infrastructures in region 3 of Ahvaz city

زیرساخت‌ها	زیرساخت کاربری‌های ویژه (حیاتی، حساس و مهم)	زیرساخت‌های خدمات اضطراری	زیرساخت‌های عمومی- مردمی	زیرساخت‌های مدیریتی
معیارها	مخابرات، سیستم‌های تأمین برق، ذخیره و حمل‌ونقل نفت و گاز، بانک‌داری و تأمین مالی، پایانه‌ها و ایستگاه‌های ارتباطی	بیمارستان و مراکز درمانی، پاسگاه‌های پلیس و پادگاه نظامی، مراکز آتش‌نشانی، مراکز امداد و نجات و پایگاه‌های مدیریت بحران	هتل و مهمان‌سرا، پارک، اماکن مذهبی، مدارس و آموزشگاه‌ها، مراکز آموزش عالی	شهرداری، ستاد مدیریت بحران، اداره گاز، اداره آب، اداره برق، اداره مخابرات

همچنین، جهت سنجش الگوی هم‌جواری، ۱۴ لایه مخاطرات محیطی و زمین‌زاد مؤثر در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز شامل خطر سیلاب، فاصله از رودخانه کارون، تراکم صنعتی، سطح آب زیرزمینی، شبکه زهکشی، نوع خاک، کاربری‌های ناسازگار، مراکز درمانی، راه‌های شریانی، تراکم جمعیت، فضای سبز و مراکز حساس شهری شناسایی شدند.

به منظور وزن‌دهی و پردازش عوامل، از مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتب فازی (Fuzzy) استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا ماتریس مقایسات زوجی بر اساس نظرات خبرگان و طیف کلامی متناظر با اعداد فازی مثلثی (Triangular Fuzzy Numbers) تشکیل گردید. با استفاده از اعداد فازی، عدم قطعیت و قضاوت‌های انسانی در ارزیابی معیارها تعدیل شد. سپس با بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی فازی، وزن نهایی شاخص‌ها استخراج گردید. جهت تضمین اعتبار قضاوت‌ها، نرخ سازگاری (Consistency Ratio - CR) برای ماتریس‌های مقایسات زوجی محاسبه شد و از آنجا که مقدار آن کمتر از ۰.۰۵ به دست آمد، سازگاری درون‌گروهی مقایسات تأیید گردید. در نهایت، با ابزار Distance فواصل هر لایه مخاطره تعیین شد و با استفاده از تحلیل ترکیبی Fuzzy و ابزار Fuzzy Membership، نقشه‌های فواصل استانداردسازی شدند. سپس برای ریزپهنه‌بندی حریم ایمنی و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری، از عملگر Fuzzy Overlay (با در نظر گرفتن عملگر گامای فازی) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد.

۵- نتایج و بحث

امروزه با توجه به گسترش روزافزون کالبد شهری و افزایش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد، شناسایی حریم‌های ایمنی و مدیریت خطرپذیری به یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی شهری و پدافند غیرعامل بدل شده است. منطقه ۳ شهرداری اهواز نیز به دلیل برخورداری از بافت متراکم، کاربری‌های متنوع و قرارگیری در پهنه‌های مستعد مخاطرات، نیازمند ارزیابی دقیق فضایی است. در این راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه و رویکرد تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتب فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (Fuzzy-AHP و GIS)، به ریزپهنه‌بندی حریم ایمنی و تعیین سطح آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری این منطقه پرداخته است تا از طریق شناسایی کانون‌های بحران و زون‌های پرمخاطره، بستر لازم جهت ارتقای پایداری و کاهش خسارات احتمالی فراهم گردد.

۵-۱- گام اول: سنجش الگوی هم‌جواری در زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز

به منظور تحلیل فضایی و سنجش الگوی هم‌جواری در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد، گام نخست بر شناسایی،

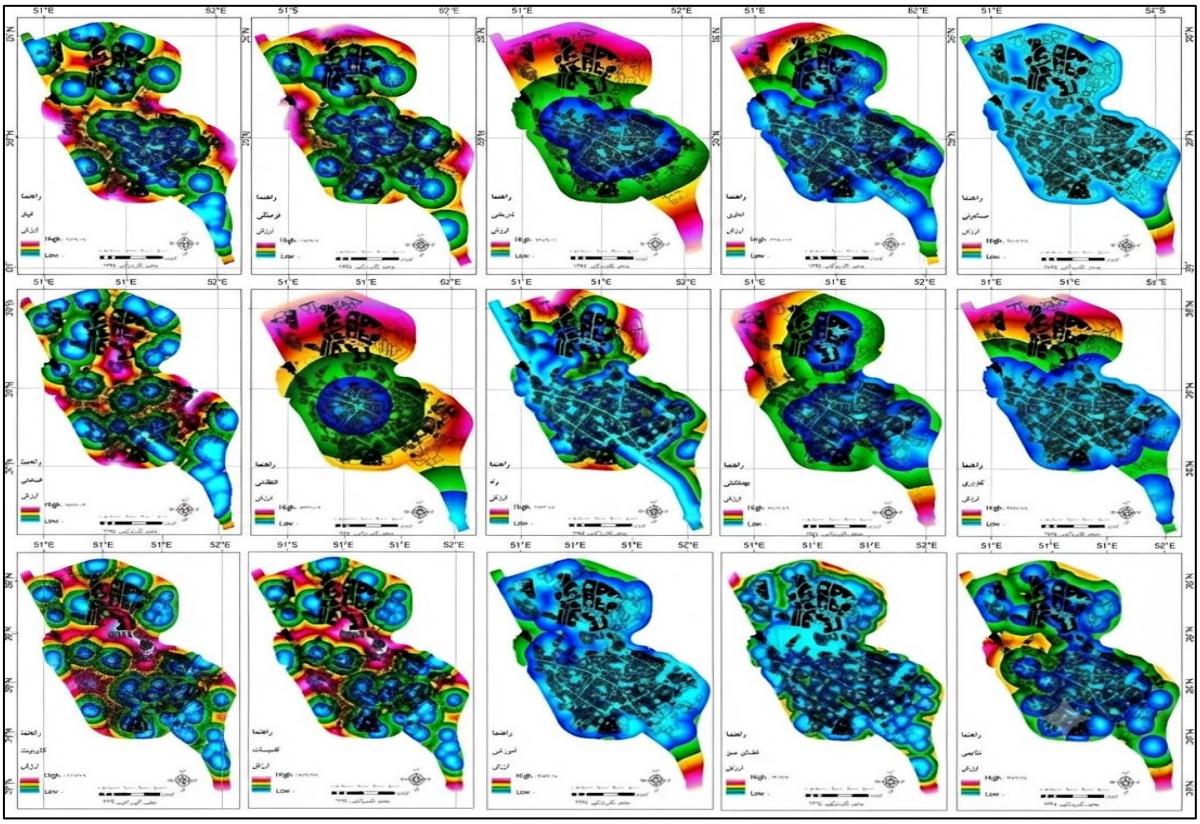
معرفی و پردازش ۱۴ لایه اطلاعاتی مؤثر متمرکز گردید. این لایه‌ها شامل کاربری‌ها و عناصر کلیدی کالبدی از جمله انبارهای شهری، مراکز فرهنگی، تاریخی، اداری، مسکونی، صنایع، انتظامی، راه‌های شریانی، بهداشتی-درمانی، تجاری، تأسیسات شهری، آموزشی، فضای سبز و مراکز مذهبی هستند که هر یک به سهم خود می‌توانند نقش تشدیدکننده یا تعدیل‌کننده در میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی ایفا کنند. در این راستا، با بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی مجموعه Distance (مانند ابزارهای تجزیه و تحلیل فاصله و حریم‌سازی) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS)، برای هر یک از لایه‌های چهارده‌گانه متناسب با استانداردهای پدافند غیرعامل و ضوابط ایمنی، حریم‌های هم‌جواریِ مشخصی تعریف و ترسیم شد (جدول ۳). با توجه به اینکه ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در چهار دسته اصلی (شامل زیرساخت‌های ویژه، اضطراری، عمومی-مردمی و مدیریتی) انجام گرفته است، تقاطع و تحلیل این فواصل به ازای هر یک از دسته‌های زیرساختی منجر به تولید مجموعاً ۵۶ نقشه تخصصی فواصل گردید. این نقشه‌های پایه، به عنوان لایه‌های مکانی اولیه، بستر لازم را برای ورود به مرحله استانداردسازی و فازی‌سازی فراهم ساختند (به علت دلیل محدودیت صفحه در فصلنامه، صرفاً نقشه‌های آسیب‌پذیری زیرساخت ویژه ارائه شده است). در جدول ۳ لایه‌های استخراج شده موثر در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز آورده شده است.

شکل (۲) نشان داد که بسیاری از زیرساخت‌های حیاتی و کاربری‌های ویژه در منطقه ۳ شهر اهواز در مجاورت یا درون پهنه‌های با پتانسیل آسیب‌پذیری بالا قرار دارند که این وضعیت با توجه به ماهیت مخاطرات محیطی و زمین‌زاد در این کلان‌شهر، ضریب ریسک بحران را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. تحلیل لایه‌های فاصله و حریم‌های ترسیم‌شده حاکی از آن است که فشردگی و هم‌جواری نااصولی برخی از این زیرساخت‌ها با گسل‌ها یا کانون‌های تنش محیطی، در صورت وقوع حوادث زمین‌زاد، می‌تواند به یک اثر زنجیره‌ای و فروپاشی عملکردی در شبکه خدمات‌رسانی منطقه منجر شود؛ بنابراین، تعیین دقیق حریم ایمنی و اعمال ضوابط پدافند غیرعامل در این پهنه‌ها برای کاهش آسیب‌پذیری کالبدی و ارتقای تاب‌آوری شهری منطقه ۳ اهواز امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول۳- لایه‌های استخراج شده موثر در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز (ماخذ، نگارندگان،۱۴۰۵)

Table 3 - Extracted layers affecting the vulnerability of urban infrastructure in region 3 of Ahvaz city

لایه‌ها	کد	لایه‌ها	کد
انبار	**A1**	راه‌های شریانی	**A8**
فرهنگی	**A2**	مراکز بهداشتی درمانی	**A9**
تاریخی	**A3**	مراکز تجاری	**A10**
مراکز اداری	**A4**	تاسیسات شهری	**A11**
مراکز مسکونی	**A5**	مراکز آموزشی	**A12**
صنایع شهری	**A6**	فضای سبز	**A13**
مراکز انتظامی	**A7**	مراکز مذهبی	**A14**



شکل۲- حریم هم‌جواری زیرساخت‌های کاربری ویژه (ترسیم، نگارندگان: ۱۴۰۵)
Figure 2. Neighborhood privacy of special use infrastructures

۵-۲- گام دوم: استانداردسازی لایه‌های معیار (FuzzyMembership)

با توجه به اینکه نقشه‌های فاصله استخراج‌شده در مرحله قبل دارای ماهیت‌های گوناگون بوده و فاقد واحدهای اندازه‌گیری همگن هستند، امکان تلفیق مستقیم آن‌ها وجود ندارد. به همین منظور، جهت استانداردسازی، یکسان‌سازی مقیاس‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری مدل در مواجهه با عدم قطعیت‌های محیطی، تمامی لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از توابع عضویت فازی به بازه عددی استاندارد بین صفر تا یک تبدیل شدند. در این طیف فازی‌سازی‌شده، عدد صفر نشان‌دهنده بیشترین تطابق و رعایت اصول هم‌جواری (کمترین آسیب‌پذیری و ایمنی مطلوب) و عدد یک نشان‌دهنده کمترین میزان رعایت اصول هم‌جواری و در نتیجه حداکثر آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد است.با عنایت به اینکه میزان اثرگذاری و اهمیت هر یک از لایه‌های چهارده‌گانه در میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز متفاوت است، آستانه‌ها و فواصل آسیب‌پذیری و همچنین ضرایب وزنی ویژه‌ای برای هر کدام از عوامل چهارگانه (با توجه به نوع کاربری زیرساخت) تعریف و اعمال گردید. جدول (۴) به عنوان نمونه، توابع فازی، آستانه فواصل هم‌جواری و ضرایب تخصیص‌یافته را برای زیرساخت‌های ویژه نمایش می‌دهد.

پس از تدوین و کالیبره‌کردن دقیق توابع عضویت فازی برای هر یک از چهارده کاربری مؤثر در ارتباط با زیرساخت‌های شهری، نقشه‌های فازی‌سازی‌شده بر مبنای نوع تابع فازی منتخب (مانند توابع کاهشی و خطی) و فواصل بهینه هم‌جواری ذکرشده در جداول تخصصی تولید گردیدند. در این مرحله کلیدی، به ازای هر یک از عوامل چهارگانه زیرساخت در تلاقی با کاربری‌های چهارده‌گانه، تعداد چهارده نقشه پهنه‌بندی استاندارد ایجاد شد که با احتساب تمامی دسته‌ها، در مجموع ۵۶ نقشه فازی تخصصی استخراج گردید. این لایه‌های اطلاعاتی استانداردشده و همگن، به عنوان پایگاه داده مکانی مبنا

عمل کرده و بستر لازم را برای ورود به مرحله بعدی محاسبات، وزن‌دهی معیارهای تحلیل سلسله‌مراتب فازی (Fuzzy-AHP) و در نهایت تلفیق نهایی لایه‌ها فراهم ساختند (جمعا ۵۶ نقشه که جهت جلوگیری از طولانی شدن این نقشه‌ها در مقاله درج نشدند).

جدول۴- توابع فازی استانداردسازی شاخص‌ها برای زیرساخت‌های ویژه(منبع نگارندگان، ۱۴۰۵)
Table 4 - Fuzzy functions for standardizing indicators for special infrastructures

لایه‌ها	تابع آسیب‌پذیری	حریم همجواری	ضریب
انبار	Small	۵۰۰	۵
فرهنگی	Small	۲۰۰	۳
تاریخی	Small	۲۵۰	۳
مراکز اداری	Small	۶۵۰	۵
مراکز مسکونی	Small	۵۰۰	۵
صنایع شهری	Small	۴۰۰	۵
مراکز انتظامی	Small	۷۰۰	۷
راه های شریانی	Linear	۵۰۰	۵
مراکز بهداشتی درمانی	Small	۲۰۰	۲
مراکز تجاری	Small	۲۵۰	۳
تاسیسات شهری	Small	۵۰۰	۳
مراکز آموزشی	Small	۳۰۰	۲
فضای سبز	Small	-	-
مراکز مذهبی	Small	-	-

۵-۳- گام سوم: تهیه نقشه‌های فاکتور فازی در محیط FAHP-GIS

به منظور استخراج اوزان نسبی و تعیین ضریب اهمیت هر یک از چهارده کاربری و عامل مؤثر در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری، از رویکرد تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتب فازی (Fuzzy AHP) بهره گرفته شده است. فرآیند وزن‌دهی و ساختارسازی فاکتورها در این پژوهش طی مراحل زیر انجام پذیرفته است:

-تشکیل ماتریس مقایسات زوجی فازی: در گام نخست، با توجه به ماهیت فازی نظرات کارشناسی و به منظور پوشش دادن عدم قطعیت‌ها و قضاوت‌های کیفی خبرگان، کاربری‌های چهارده‌گانه مؤثر در مخاطرات محیطی و زمین‌زاد که هر یک به سهم خود در تشدید یا تعدیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری نقش دارند- در قالب ماتریس‌های مقایسه زوجی با استفاده از مقیاس‌های فازی ارزیابی و مقایسه شدند.

-وزن‌دهی به دسته‌های اصلی زیرساخت: در مرحله بعدی، با توجه به تفاوت در سطح اهمیت، کارکرد و میزان حساسیت زیرساخت‌های شهری، چهار دسته اصلی زیرساخت مورد مطالعه (شامل زیرساخت‌های ویژه، اضطراری، عمومی- مردمی و مدیریتی) به صورت ساختاریافته نسبت به یکدیگر مقایسه شده و بر اساس

خروجی مدل، اوزان نهایی آن‌ها استخراج گردید (همان‌طور که در جدول ۵ مشهود است).

تلفیق اوزان و تولید لایه‌های فاکتور فازی: اوزان به‌دست‌آمده از مدل Fuzzy-AHP که نشان‌دهنده ضریب اهمیت نسبی هر عامل در بروز آسیب‌پذیری هستند، با استفاده از عملگرهای محاسباتی و ابزارهای تحلیلی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) اعمال شدند تا نقشه‌های فاکتور فازی برای هر یک از زیرساخت‌ها به صورت تفکیک‌شده آماده‌سازی شوند. در جدول(۵) به بررسی ماتریس مقایسات زوجی لایه‌های معیار در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز پرداخته شده است.

بر اساس مبانی ریاضی مدل تلفیقی و به‌منظور تعیین قطعی درجه اهمیت و وزن نهایی مؤلفه‌ها، مقادیر فازی استخراج‌شده از ماتریس‌های مقایسات زوجی وارد محاسبات تحلیلی شدند. در این مرحله، با استناد به روابط آماری و روابط تخصصی استاندارد در مدل (روابط شماره ۱ تا ۳)، ابتدا اعداد فازی مثلثی به مقادیر قطعی و سازگار تبدیل گردیدند؛ سپس از طریق به‌کارگیری رابطه شماره ۴، میزان و درجه بزرگی نسبی هر یک از مقادیر و مؤلفه‌های آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز نسبت به یکدیگر محاسبه شد. در نهایت، اوزان نهایی به‌دست‌آمده از این فرآیند، به عنوان ضرایب اثرگذاری در لایه‌های فواصل استانداردسازی‌شده اعمال شدند تا بستر لازم برای تلفیق نهایی و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فراهم گردد (جدول ۶).

شکل(۳)، وضعیت آسیب‌پذیری گونه‌های مختلف زیرساخت‌های شهری در منطقه ۳ اهواز را در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد به تصویر می‌کشد. با توجه به مقادیر نرمال‌شده (بین ۰ تا ۱)، ملاحظه می‌شود که برخی کاربری‌های حیاتی از جمله «تاسیسات شهری» (۰/۰۹۹)، «مراکز انتظامی» (۰/۰۹۹) و «راه‌های ارتباطی» (۰/۰۷۱) در پهنه‌های با آسیب‌پذیری نسبتاً بالا قرار دارند که این امر در صورت وقوع مخاطراتی مانند فرونشست زمین یا سیلاب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، می‌تواند موجب اختلال جدی در خدمات‌رسانی کل منطقه گردد. در مقابل، کاربری‌هایی نظیر «فضای سبز» (۰/۰۴۶) و «مراکز آموزشی» (۰/۰۵۲) کمترین میزان آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. این توزیع ناهمگن آسیب‌پذیری، ضرورت بازنگری در مکان‌یابی زیرساخت‌های ویژه و اتخاذ تدابیر مهندسی و پدافند غیرعامل برای مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی در برابر عوامل زمین‌زاد را در منطقه ۳ اهواز آشکار می‌سازد. همان طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

پس از تعیین دقیق وزن‌های نسبی و ضرایب اهمیت هر یک از کاربری‌ها از طریق مدل تحلیل سلسله‌مراتب فازی (Fuzzy-AHP)، گام بعدی معطوف به انتقال و اعمال این اوزان در درون نقشه‌های استانداردسازی‌شده مکانی گردید. در این مرحله کلیدی، با بهره‌گیری از رویکردها و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM)، ارزش هم‌جواری و میزان تأثیرگذاری هریک از چهارده کاربریِ مدنظر نسبت به دسته‌های چهارگانه زیرساخت‌های شهری مورد سنجش و ارزیابی عمیق قرار گرفت. سپس با استفاده از ابزار تحلیلی جمع وزنی (Weighted Sum) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اوزان به‌دست‌آمده بر لایه‌های اطلاعاتی اعمال شد؛ فرآیندی که به تفکیک برای تمامی عوامل اجرا گردید و در نهایت منجر به تولید نقشه‌های مجزای فاکتور فازی شد، به‌گونه‌ای که با احتساب تمامی لایه‌ها و زیرساخت‌ها، مجموعاً ۵۶ نقشه فاکتور فازی تخصصی به عنوان خروجی‌های میانی جهت ورود به مرحله تلفیق نهایی آماده گردید. در جدول(۷) به بررسی اولویت کاربری‌های چهارده گانه نسبت به زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز از طریق AHP- FUSSY پرداخته شده است.

جدول۵- ماتریس مقایسات زوجی لایه‌های معیار در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز (منبع نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 5 - Pairwise comparison matrix of criterion layers in the vulnerability of urban infrastructure in region 3 of Ahvaz city

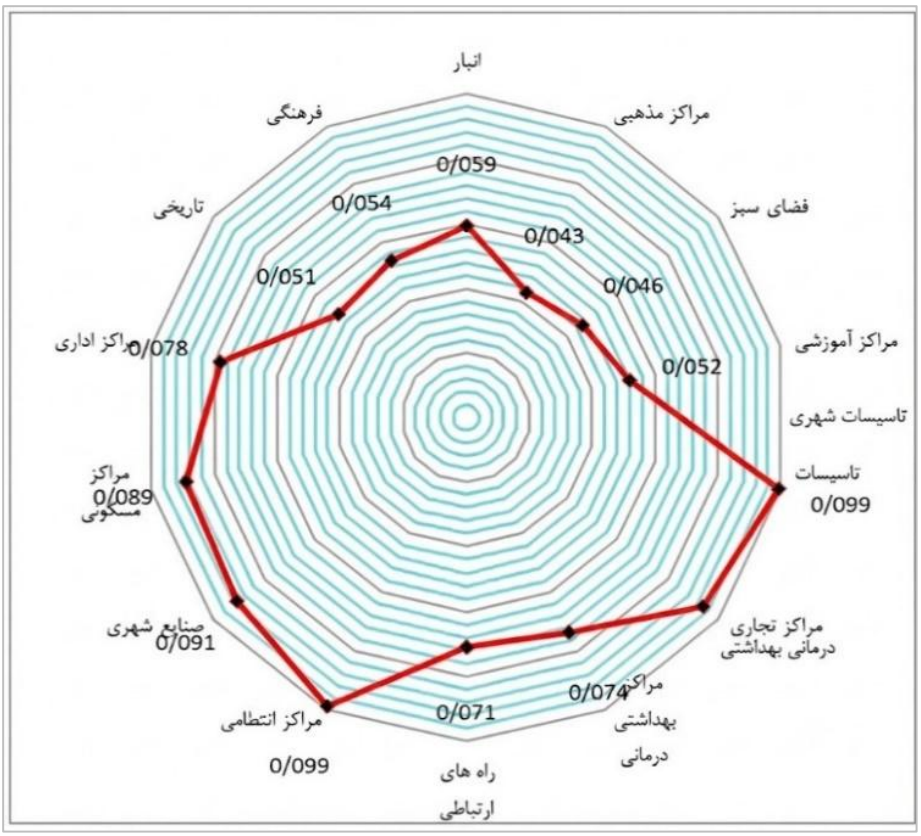
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
A1	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۶،۷،۸)	(۸،۹،۱۰)	(۳،۴،۵)	(۳،۴،۵)	(۶،۷،۸)	(۶،۷،۸)	(۵،۶،۷)	(۵،۶،۷)	(۵،۶،۷)	(۲،۴،۵)	(۳،۴،۵)	(۱،۲،۳)
A2	(۲۲،۲۳،۲۴)	(۱،۱،۱)	(۵،۶،۷)	(۵،۶،۷)	(۲،۳،۴)	(۲،۳،۴)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۴،۵،۶)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۳،۴،۵)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)
A3	(۱۶،۲۷،۷۸)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۱۳،۲۴،۲۵)	(۲۶،۲۷،۲۸)	(۴،۵،۶)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۵،۶،۷)	(۵،۶،۷)	(۳،۴،۵)	(۱۳،۲۴،۲۵)	(۲۳،۷۴،۷۵)
A4	(۷۸،۷۹،۷۰)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۷۲،۷۳،۷۴)	(۱،۱،۱)	(۷۴،۷۵،۷۶)	(۲۴،۲۵،۷۶)	(۵،۶،۷)	(۲۵،۲۶،۲۷)	(۳،۴،۵)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)	(۵،۶،۷)	(۷۶،۷۷،۷۸)	(۲۷،۲۸،۲۹)
A5	(۱۲،۱۳،۲۴)	(۷۲،۱۳،۲۴)	(۳،۴،۵)	(۴،۵،۶)	(۱،۱،۱)	(۲۲،۲۳،۲۴)	(۶،۷،۸)	(۵،۶،۷)	(۵،۶،۷)	(۶،۷،۸)	(۳،۴،۵)	(۲،۳،۴)	(۲،۳،۴)	(۱،۲،۳)
A6	(۱۲،۲۴،۷۵)	(۷۲،۱۳،۲۴)	(۶،۷،۸)	(۴،۵،۶)	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۶،۷،۸)	(۵،۶،۷)	(۴،۵،۶)	(۵،۶،۷)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۲،۳،۴)	(۱،۲،۳)
A7	(۱۶،۲۷،۷۸)	(۲۴،۲۵،۲۶)	(۷۴،۷۵،۷۶)	(۲۵،۱۶،۲۷)	(۷۶،۷۷،۷۸)	(۲۶،۲۷،۲۸)	(۱،۱،۱)	(۲۲،۲۳،۲۴)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲،۳،۴)	(۱۲،۱۳،۷۴)	(۲،۳،۴)	(۷۴،۷۵،۷۶)	(۲۵،۱۶،۲۷)
A8	(۱۶،۲۷،۷۸)	(۲۳،۷۴،۷۵)	(۷۴،۲۵،۷۶)	(۵،۶،۷)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۲۵،۲۶،۲۷)	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۳،۴،۵)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲۴،۷۵،۲۶)
A9	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۲۴،۷۵،۲۶)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲۳،۷۴،۷۵)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۳،۴،۵)	(۲۲،۲۳،۲۴)	(۱،۱،۱)	(۴،۵،۶)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۷۲،۲۳،۲۴)	(۲۳،۷۴،۷۵)
A10	(۷۵،۷۵،۲۶)	(۷۴،۷۵،۲۶)	(۷۵،۷۵،۷۶)	(۷۲،۱۳،۷۴)	(۷۶،۷۷،۷۸)	(۲۵،۲۶،۲۷)	(۲۲،۱۳،۲۴)	(۲۴،۲۵،۲۶)	(۷۴،۲۵،۷۶)	(۱،۱،۱)	(۳،۴،۵)	(۷۲،۲۳،۷۴)	(۷۲،۲۳،۷۴)	(۲۴،۲۵،۲۶)
A11	(۷۵،۷۶،۷۸)	(۲۳،۷۴،۷۵)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲،۳،۴)	(۷۴،۲۵،۷۶)	(۷۳،۷۴،۷۵)	(۷۳،۷۴،۷۵)	(۱،۱،۱)	(۴،۵،۶)	(۳،۴،۵)	(۲۴،۲۵،۲۶)
A12	(۲۳،۷۴،۷۵)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۷۵،۷۶،۷۷)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲،۳،۴)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲۲،۱۳،۲۴)	(۲۳،۷۴،۷۵)	(۲۲،۲۳،۲۴)	(۷۲،۷۳،۷۴)	(۱۳،۲۴،۷۵)	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۲۳،۷۴،۷۵)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
A13	(۲۲,۱۳,۲۴)	(۲۲,۱۳,۲۴)	(۶,۷,۸)	(۳,۴,۵)	(۲,۳,۴)	(۲,۳,۴)	(۴,۵,۶)	(۴,۵,۶)	(۲۲,۲۳,۲۴)	(۲۲,۲۳,۲۴)	(۴,۵,۶)	(۲,۳,۴)	(۱,۱,۱)	(۱۲,۱۳,۲۴)
A14	(۷۱,۲۲,۷۳)	(۲۳,۷۴,۷۵)	(۳,۴,۵)	(۴,۵,۶)	(۴,۵,۶)	(۳,۴,۵)	(۴,۵,۶)	(۵,۶,۷)	(۷۱,۲۲,۷۳)	(۷۱,۲۲,۷۳)	(۷,۸,۹)	(۳,۴,۵)	(۲۳,۷۴,۷۵)	(۱,۱,۱)

جدول۶- روابط آماری AHP- FUSSY (منبع نگارندگان، ۱۴۰۵)

Table 6- AHP-FUSSY statistical relationships

رابطه۴	رابطه۳	رابطه۲	رابطه ۱
$\begin{cases} andV(M_1 \geq M_2) = 1 \\ andV(M_1 \geq M_2) = hgt(M_{1\cap} M_2) \\ hgt(M_{1\cap} M_2) = \dfrac{u1 - j2}{(u1 - j2) + (m_2 - m_1)} \end{cases}$	$(\sum_{i=1}^{n} + \sum_{j}^{m} m_{gi}^{j})^{-1} \Rightarrow$	$\sum_{i=1}^{n} \times \sum_{j}^{m} m_{gi}^{j}$	$\sum_{j-}^{m} = M_{gi}^{j}$



شکل۳- وزن کاربری‌های چهارده‌گانه تاثیرگذار در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های ویژه منطقه ۳ شهر اهواز

Figure 3. Weight of fourteen land uses affecting the vulnerability of special infrastructures in region 3 of Ahvaz city

جدول۷- اولویت کاربری‌های چهارده‌گانه نسبت به زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز از طریق AHP- FUSSY (منبع نگارندگان، ۱۴۰۵)

Figure 3 - Weight of fourteen land uses affecting the vulnerability of special infrastructures in Region 3 of Ahvaz city

عوامل کاربری	زیرساخت ویژه		زیرساخت اضطراری		زیرساخت عمومی و مردمی		زیرساخت مدیریتی	
	وزن	رتبه	وزن	رتبه	وزن	رتبه	وزن	رتبه
انبار	۰/۰۵۹	۹	۰/۰۷۰	۵	۰/۰۸۸	۴	۰/۰۵۰	۱۲
فرهنگی	۰/۰۵۴	۱۰	۰/۰۴۸	۱۴	۰/۰۵۳	۱۲	۰/۰۸۶	۶
تاریخی	۰/۰۵۱	۱۲	۰/۰۶۸	۶	۰/۰۳۹	۱۴	۰/۰۳۰	۱۴
مراکز اداری	۰/۰۷۸	۶	۰/۰۵۰	۱۳	۰/۰۶۹	۷	۰/۰۸۶	۵
مراکز مسکونی	۰/۰۸۹	۵	۰/۰۹۰	۴	۰/۰۸۶	۵	۰/۰۶۵	۱۰
صنایع شهری	۰/۰۹۱	۴	۰/۰۶۰	۹	۰/۱۰۲	۱	۰/۰۷۱	۷
مراکز انتظامی	۰/۰۹۹	۱	۰/۰۹۶	۳	۰/۰۷۵	۱۰	۰/۰۷۰	۸
راه‌های شریانی	۰/۰۷۱	۸	۰/۱۲۰	۲	۰/۰۴۹	۱۳	۰/۰۹۱	۴
مراکز بهداشتی درمانی	۰/۰۷۴	۷	۰/۱۰۳	۱	۰/۰۶۸	۸	۰/۰۶۸	۹
مراکز تجاری	۰/۰۹۴	۳	۰/۰۶۱	۸	۰/۰۷۳	۶	۰/۱۰۰	۱
تأسیسات شهری	۰/۰۹۹	۲	۰/۰۶۳	۷	۰/۰۸۸	۳	۰/۰۹۲	۳
مراکز آموزشی	۰/۰۵۲	۱۱	۰/۰۵۹	۱۰	۰/۰۹۲	۲	۰/۰۹۸	۲
فضای سبز	۰/۰۴۶	۱۳	۰/۰۵۵	۱۲	۰/۰۶۲	۹	۰/۰۵۰	۱۱
مراکز مذهبی	۰/۰۴۳	۱۴	۰/۰۵۷	۱۱	۰/۰۵۶	۱۱	۰/۰۴۳	۱۳

بر اساس نتایج مدل‌سازی تحلیل سلسله‌مراتب فازی در ارزیابی اولویت کاربری‌های چهارده‌گانه منطقه ۳ اهواز، مراکز انتظامی (با وزن ۰/۰۹۹) در زیرساخت‌های ویژه و مراکز بهداشتی درمانی (با وزن ۰/۱۲۰) در زیرساخت‌های اضطراری بالاترین اولویت و آسیب‌پذیری را به خود اختصاص داده‌اند؛ این در حالی است که در بخش زیرساخت‌های عمومی و مردمی، صنایع شهری (با وزن ۰/۱۰۲) و در زیرساخت‌های مدیریتی، مراکز تجاری (با وزن ۰/۱۰۰) بیشترین اهمیت و اولویت را در مدیریت مخاطرات محیطی و زمین‌زاد منطقه دارا می‌باشند، که این امر ضرورت توجه ویژه به مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی این کاربری‌های حیاتی را در برنامه‌ریزی‌های پدافند غیرعامل و کاهش خطرپذیری شهری برجسته می‌سازد.

۵-۴- گام چهارم: تلفیق نقشه‌های فاکتور و تهیه نقشه‌های هم‌جواری در زیرساخت‌های چهارگانه

به منظور هم‌پوشانی نهایی تمامی لایه‌های استانداردسازی‌شده و دستیابی به نقشه جامع و یکپارچه ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری، از عملگر پیشرفته‌ی تلفیقی گامای فازی (Fuzzy Gamma) استفاده گردید. در مدل‌سازی‌های مکانی و ارزیابی مخاطرات، پارامتر گاما (gamma) به عنوان یک عامل کلیدی، نقش مستقیمی در تنظیم شدت تعامل میان عملگرهای فازی اشتراک (AND) و اجتماع (OR) ایفا

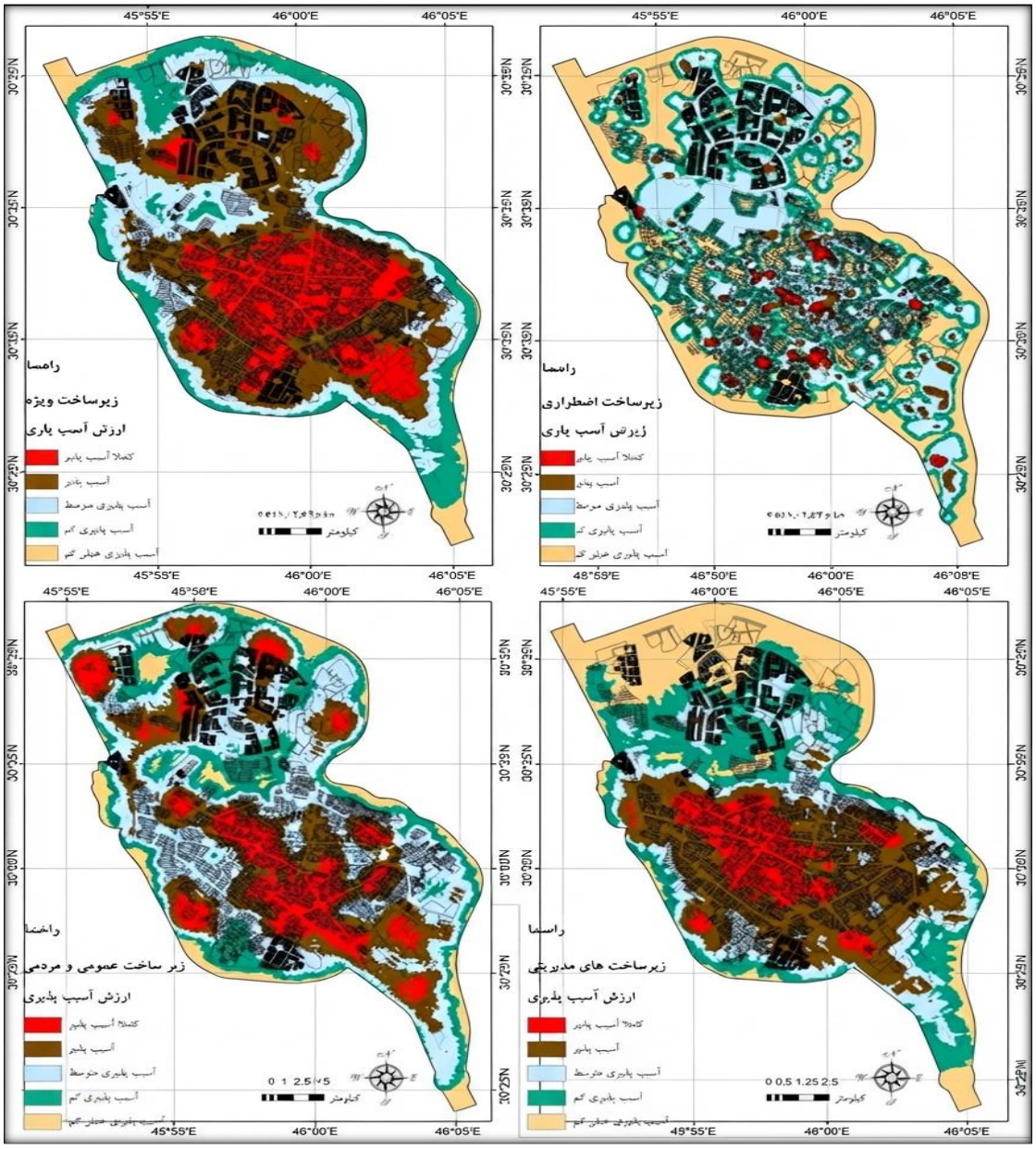
می‌کند و انعطاف‌پذیری بالایی را در تلفیق داده‌ها به نمایش می‌گذارد.در این پژوهش، پس از بررسی‌های ساختاری دقیق و تطبیق الگوها با شرایط خاص محیطی و زمین‌زاد منطقه ۳ شهر اهواز، مقدار پارامتر گاما دقیقا معادل ۰/۹ (gamma = 0.9) انتخاب شد. مبنای منطقی گزینش این مقدار بالا، ایجاد یک تعادل بهینه و منطقی میان اثر هم‌افزایی (Synergistic Effect) ناشی از تداخل چندین مخاطره محیطی هم‌جوار و جلوگیری از بروز خطای حدکثر مطلق‌گرایی (Absolute Extremism) در نقاط بحرانی است. به‌کارگیری این ضریب بهینه این امکان را فراهم می‌سازد تا شدت خطرات و آسیب‌پذیری‌های پیرامونی با بالاترین دقت ممکن در بافت متراکم و کالبد شهری منطقه منعکس شده و خروجی نهایی از اعتبار علمی و سازگاری بالاتری با واقعیت‌های میدانی برخوردار گردد. همان طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است.

بر اساس نقشه‌های ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد، پهنه‌های با آسیب‌پذیری خیلی زیاد (رنگ قرمز) در بخش‌های مرکزی و کانونی منطقه تراکم بیشتری دارند؛ به‌گونه‌ای که در نقشه زیرساخت‌های ویژه و مدیریتی، هسته‌های مرکزی بیشترین وسعت پهنه‌های بحرانی را به خود اختصاص داده‌اند، در حالی که در نقشه زیرساخت‌های اضطراری، این پهنه‌های بحرانی با پراکندگی نقطه‌ای و شعاعی بیشتری در سطح منطقه توزیع شده‌اند و در بخش زیرساخت‌های عمومی و مردمی نیز تمرکز آسیب‌پذیری شدید در پهنه‌های خاصی از بافت شهری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده لزوم توجه به برنامه‌ریزی‌های پدافندی و کاهش خطرپذیری متناسب با نوع کاربری و زیرساخت است.

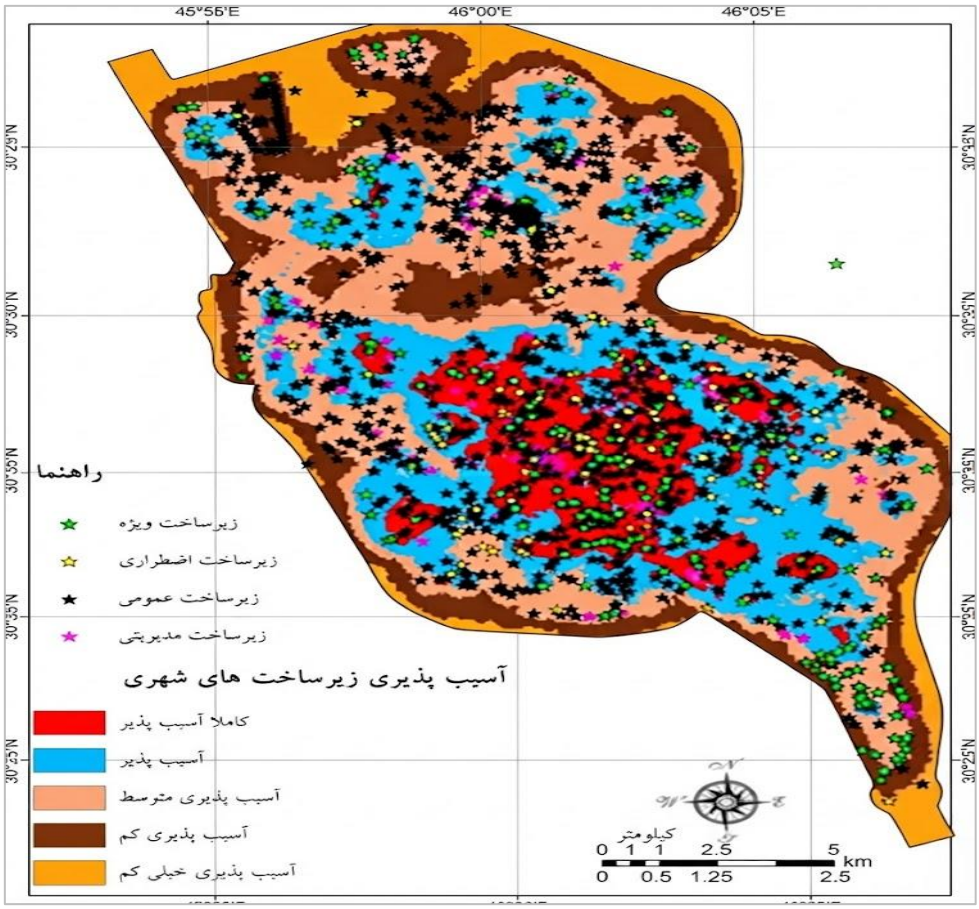
۵-۵- گام پنجم: هم‌پوشانی لایه‌ها با Fuzzy Overlay و تهیه نقشه ریزپهنه‌بندی حریم ایمنی و آسیب‌پذیری

پس از تلفیق نقشه های فاکتور فازی برای هر عامل، پهنه آسیب‌پذیری عوامل محتلف مشخص شده است. از آنجا که هر کدام از عوامل از دیدگاه پدافند غیرعامل دارای درجه‌ی اهمیت متفاوتی است، ضرورت دارد درجه اهمیت هریک از این عوامل مشخص شده، با تلفیق آن‌ها نقشه نهایی هم-جواری استخراج شود. در این مرحله، زیرساخت‌های شهری با استناد به نظر خبرگان متخصص و با لحاظ کاربرد آن‌ها، از طریق مدل AHP- FUZZY وزن‌دهی شده‌اند. پس از اعمال اوزان در محیط Arc GIS از طریق Fuzzy Overlay و با استفاده از گاما (Gamma O/9) هم‌پوشانی نقشه‌ها صورت پذیرفته و نقشه خروجی حاصل؛ ریز پهنه-بندی ایمنی و آسیب‌پذیری در زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز را نشان می‌دهد همان طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

بر اساس نقشه شکل(۵) پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا و کاملاً آسیب‌پذیر (نشان‌داده‌شده با رنگ‌های قرمز و آبی) بیشتر در بخش‌های مرکزی و متراکم منطقه تجمع یافته‌اند و تراکم بالایی از انواع زیرساخت‌های عمومی، اضطراری، ویژه و مدیریتی در این زون‌های بحرانی قرار گرفته‌اند؛ در مقابل، پهنه‌های با آسیب‌پذیری کم و خیلی کم (رنگ‌های قهوه‌ای و نارنجی) عمدتاً حواشی و بخش‌های پیرامونی منطقه را پوشش می‌دهند که این توزیع فضایی نشان‌دهنده لزوم بازنگری و اتخاذ راهبردهای پدافند غیرعامل و ایمن‌سازی زیرساخت‌های حیاتی واقع در هسته‌های مرکزی آسیب‌پذیر است. در جدول (۸) به بررسی میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز پرداخته شده است.



شکل۴- نقشه‌های هم‌جواری در زیرساخت‌های چهارگانه منطقه ۳ شهر اهواز
Figure 4. Neighborhood maps in the four infrastructures of region 3 of Ahvaz city



شکل۵- ریز پهنه‌بندی ایمنی و آسیب‌پذیری در زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز

Figure 5. Safety and vulnerability micro-zoning in urban infrastructure in Region 3 of Ahvaz city

جدول۸- میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز(منبع، محاسبات نگارندگان:۱۴۰۵)

Table 8- Vulnerability of urban infrastructure in Region 3 of Ahvaz city

طبقه‌بندی آسیب‌پذیری	مساحت پهنه آسیب‌پذیری	درصد پهنه آسیب‌پذیری	ویژه		اضطراری		عمومی		مدیریتی		درصد کل
			تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد	
کاملا آسیب‌پذیر	۹۸۳۱۸۴۰	۲۹/۷۳	۱۲۵	۴۷/۸۹	۶۱	۵۴/۹۵	۳۰۲	۵۰/۳۳	۴۱	۴۵/۵۵	۵۰/۴۷
آسیب‌پذیر	۹۵۸۹۶۶۴	۲۹	۱۰۳	۴۶/۳۹	۳۴	۳۰/۶۳	۱۲۶	۲۱	۳۷	۴۱/۱۱	۲۸/۲۴
آسیب‌پذیری متوسط	۷۰۰۵۱۰۶	۲۱/۱۸	۲۸	۱۰/۷۲	۶	۵/۴۰	۱۰۸	۱۸	۱۰	۱۱/۱۱	۱۴/۳۱
آسیب‌پذیری کم	۴۳۷۲۲۵۶	۱۳/۲۲	۵	۱/۹۱	۰	۰	۶۲	۱۰/۳۳	۲	۲/۲۲	۶/۴۹
آسیب‌پذیری خیلی کم	۲۲۶۷۰۱۸	۶/۸۵	۰	۰	۰	۰	۲	۰/۳۳	۰	۰	۰/۱۸

بر اساس نتایج تحلیل و ارزیابی جدول میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز در برابر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد، بیش از نیمی از مساحت منطقه (حدود ۵۸ درصد در مجموع طبقات کاملاً آسیب‌پذیر و آسیب‌پذیر) در زون‌های بحرانی و پرمخاطره قرار دارد که این امر به‌ویژه در تمرکز بالای زیرساخت‌های

ویژه (۴۷/۸۹ درصد) و مدیریتی (۴۵/۵۵ درصد) در طبقه کاملاً آسیب‌پذیر به وضوح مشهود است؛ در مقابل، تنها بخش اندکی از زیرساخت‌ها در پهنه‌های با آسیب‌پذیری کم و خیلی کم (مجموعاً کمتر از ۷/۵ درصد) جای گرفته‌اند. این توزیع نامتوازن، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری ساختاری شدید در هسته‌های کلیدی و زیرساخت‌های حیاتی منطقه بوده و بیانگر آن است که جهت‌گیری پژوهش بر ضرورت بازنگری فوری در برنامه‌ریزی‌های پدافند غیرعامل، ایمن‌سازی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ اهواز به منظور کاهش اثرات مخرب مخاطرات محیطی و زمین‌زاد تأکید تام دارد.

در نهایت با توجه به موارد بالا می‌توان گفت، یکی از ارکان اصلی پژوهش‌های کاربردی در حوزه مخاطرات، اعتبارسنجی خروجی‌های مدل است. جهت سنجش اعتبار و صحت نقشه‌های ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری حاصل از مدل Fuzzy-AHP و Gamma، خروجی نهایی مدل با داده‌های واقعی میدانی، سوابق رویدادها و مخاطرات پیشین محیطی و زمین‌زاد در منطقه ۳ اهواز و همچنین نظرات خبرگان محلی و کارشناسان مدیریت بحران مورد مقایسه و ارزیابی تطبیقی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که پهنه‌های کاملاً آسیب‌پذیر شناسایی‌شده در مدل، تطابق بسیار بالایی (با ضریب دقت قابل ملاحظه) با کانون‌های بحران واقعی، فرونشست‌ها و سوابق آب‌گرفتگی‌ها و آسیب‌های زیرساختی سال‌های گذشته در منطقه دارند؛ که این امر حاکی از کارایی بالا و پایایی مدل ارائه‌شده در ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری است.

۶- نتیجه‌گیری

آسیب‌پذیری را می‌توان نقص ذاتی در ابعاد ویژه محیط شهر دانست که بنا به ویژگی‌های بیولوژیکی، فیزیکی و مشخصه‌های طراحی آن مستعد خطر است. بررسی ساختارها و ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری، گامی اساسی به سوی تحقق چشم‌انداز آینده شهر ایمن به‌شمار می‌رود. در تحقیق کنونی، با توجه به اینکه موضوع پژوهش درباره ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری منطقه ۳ شهر اهواز با تأکید بر مخاطرات محیطی و زمین‌زاد است، پس از استخراج شاخص‌های ایمنی و آسیب‌پذیری با استفاده از روش ترکیبی، مدلی و تحلیلی AHP-Fuzzy و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سطح، مدل روابط فضایی، مکانی و درصد ریزپهنه‌بندی آسیب‌پذیری از سطح کاملاً آسیب‌پذیر تا آسیب‌پذیری خیلی کم تعیین شدند. در بررسی موضوعی و تحلیل وزن شاخص‌ها، نتایج نشان می‌دهد که در زیرساخت‌های ویژه، کاربری انتظامی با وزن ۰/۰۹۹ بیشترین اهمیت و مراکز مذهبی با وزن ۰/۰۴۳کم‌اهمیت‌ترین شاخص شناخته شده‌اند؛ همچنین در زیرساخت‌های اضطراری، مراکز بهداشتی و درمانی با وزن ۰/۱۰۳ بیشترین اهمیت و مراکز فرهنگی با وزن ۰/۰۴۸ کم‌اهمیت‌ترین شاخص‌ها هستند، در حالی که در بخش زیرساخت‌های عمومی و مردمی و مدیریتی نیز به ترتیب صنایع شهری و مراکز تجاری به عنوان اثرگذارترین شاخص‌ها در آسیب‌پذیری زیرساخت‌های منطقه ۳ شناخته شدند. در تحلیل مکانی و ریزپهنه‌بندی نهایی، حدود ۲۹/۷۳ درصد از مساحت کل محدوده در پهنه کاملاً آسیب‌پذیر و ۶/۸۵ درصد در وضعیت آسیب‌پذیری خیلی کم قرار دارند. بررسی وضعیت زیرساخت‌ها حاکی از آن است که در بخش‌های ویژه، اضطراری، عمومی و مردمی، و مدیریتی، به ترتیب ۴۷/۸۹ درصد، ۵۴/۹۵ درصد، ۵۰/۳۳ درصد و ۴۵/۵۵ درصد در وضعیت کاملاً آسیب‌پذیر جای گرفته‌اند؛ به‌طوری‌که بیش از ۵۰ درصد مجموع زیرساخت‌های شهری منطقه در این وضعیت بحرانی قرار داشته و زیرساخت‌های درمانی و خدمات اضطراری بیشترین میزان آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. این میزان بالای تمرکز زیرساخت‌ها در طبقه کاملاً آسیب‌پذیر، به‌طور مستقیم تحت تأثیر قضاوت‌های تخصصی در ماتریس مقایسات زوجی و اوزان بالایی است که مدل AHP-Fuzzy به معیارهای کلیدی هم‌جواری و دسترسی به مراکز حساس اختصاص داده است؛ به گونه‌ای که اعمال ضریب گامای بالا در فرآیند تلفیق، اثر هم‌افزایی ریسک‌ها را تشدید کرده و به این توزیع گسترده در پهنه‌های بحرانی منجر شده است. این خروجی‌ها به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیرنده عملیاتی، امکان مکان‌گزینی بهینه زیرساخت‌های حیاتی، بازنگری طرح‌های توسعه شهری مبتنی بر خطر و تهیه نقشه‌های ممنوعیت نسبی استقرار در حریم رودخانه کارون و اراضی با سطح آب زیرزمینی بالا را فراهم می‌سازد.

علاوه بر این، نتایج این پژوهش بستر لازم برای اولویت‌بندی اقدامات مقاوم‌سازی و بهسازی زیرساخت‌های موجود بر اساس شاخص‌های فاصله از رودخانه، تراکم صنعتی، سطح آب زیرزمینی و نوع خاک را مهیا کرده و با شبیه‌سازی سناریوهای بحران از جمله سیلاب ۵۰ ساله و فرونشست ناشی از رسوبات ریزدانه آبرفتی، مسیرهای جایگزین اضطراری و نقاط تجمع امن را در اختیار ستاد مدیریت بحران قرار می‌دهد. در نهایت با وزن‌دهی به ۱۴ لایه محیطی، دستورالعمل بومی پدافند غیرعامل و آیین‌نامه حریم‌گذاری زیرساخت‌ها تدوین می‌گردد. در تحلیل نهایی، مشخص شد که بخش‌های قابل توجهی از منطقه ۳ به دلیل نزدیکی به رودخانه کارون، ضعف سیستم زهکشی، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و وجود خاک‌های ریزدانه آبرفتی، در پهنه‌های مستعد سیلاب، آب‌گرفتگی و خطر نشست زمین قرار دارند. پهنه‌های دارای آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های مرکزی و جنوبی با تراکم بالای جمعیت تمرکز یافته‌اند، در حالی که نواحی دارای فضای سبز و فاصله مناسب از کاربری‌های ناسازگار، کمترین میزان آسیب‌پذیری را دارا هستند. در پایان، با توجه به شرایط طبیعی و توسعه نامتوازن شهری اهواز، پیشنهاد می‌شود توسعه آتی بر اساس ظرفیت‌های ژئومورفولوژیکی انجام شده و از استقرار زیرساخت‌های حساس در پهنه‌های سیلابی جلوگیری گردد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ارزیابی آسیب‌پذیری و ریزپهنه‌بندی زیرساخت‌های شهری با استفاده از رویکردهای تلفیقی مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (مانند مطالعات صمدی و همکاران، ۱۴۰۳؛ غضنفرپور و همکاران، ۱۴۰۲؛ سلحشور و همکاران، ۱۴۰۱ و محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۸)، به‌خوبی بر لزوم شناسایی کانون‌های بحران و تمرکز بالای آسیب‌پذیری در بافت‌های متراکم و مرکزی تأکید دارند؛ همسو با این یافته‌ها، نتایج پژوهش حاضر در منطقه ۳ اهواز نیز حاکی از تجمع زیرساخت‌های کلیدی در پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا است، با این تفاوت که پژوهش حاضر با تمرکز هم‌زمان بر دو دسته مخاطرات محیطی و زمین‌زاد (مانند فرونشست، سیلاب و شرایط آبرفتی دشت اهواز) و با به‌کارگیری توابع فازی و عملگر گامای فازی، ابعاد دقیق‌تری از شکنندگی شبکه‌های زیرساختی را در بستر این کلان‌شهر بومی‌سازی و تبیین کرده است. در مقابل، برخی پژوهش‌ها نظیر مطالعه مجدباوی (۱۴۰۰) و فابوزی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی مؤلفه‌های زمین‌شناختی خاصی همچون ناپایداری دامنه‌ای و فشردگی لرزه‌ای خاک در مقیاس‌های موردی یا طبیعی تمرکز داشته و نتایج متفاوتی را نسبت به پهنه‌های کالبدی و زیرساختی شهری نشان می‌دهند؛ با این وجود، این مطالعات ناهمسو یا تک‌بعدی نیز به‌طور غیرمستقیم مؤید اهمیتِ در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی بستر و رسوبات جوان (مانند آبرفت‌های کواترنری دشت اهواز) هستند که در پژوهش حاضر به عنوان یکی از عوامل کلیدی مخاطرات زمین‌زاد در تلفقی جامع با زیرساخت‌های شهری لحاظ شده و تبیین‌کننده وسعت پهنه‌های کاملاً آسیب‌پذیر در این منطقه است.

مراجع

Aftab, A., Houshmand, A., Piri, F., 2018. Vulnerability assessment of Urmia city with passive defense approach. Geography and Urban Space Development 5(2), 61-79. (In Persian). https://doi.org /10. 22067 /gusd.v5i2.67302

Amanpour, S., Mohamadi Deh Cheshme, M., Alizadeh, M., 2016. Evaluating Vulnerability of Kuhdasht Urban Infrastructure's through Passive Defense Approach. Town and Country Planning 8(1), 133-154. (In Persian). https://doi: 10.22059/jtcp.2016.59145

Amanpour, S., Parvizian, A., Alizadeh, M., 2016. Assessment of development level in the counties of Ilam Province. Ilam Culture Journal 16 (48, 49), 8-25. https://doi: 10.22059/jtcp.2016.59145

Amanpour, S, Alizadeh, M., Damanbagh, S., 2020. Identifying and Analyzing the Pattern of Development of Ahvaz City in the Period 1981- 2021. Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies (JSURDS) 1(1), 77-96. (In Persian). https://www.srds.ir/article_122922.html?lang=en

Ameri, M., 2024. Identification and prioritization of natural criteria for zoning areas prone to physical development in Ahvaz city. Geography and Human Relationships 7(1), 782-806. https://doi: 10.22034/gahr.2024.449494.2076.

Brusa, E., Chesi, C., Della Torre, S., 2023. Securing the church of Madonna del Sole during the emergency phase of 2016 earthquake: interoperability of different actors as an instrument for reducing seismic risk of damaged built heritage. Procedia Structural Integrity 44, 275–282. https://doi.org/ 10.1016/ j.prostr. 2023.01.036

Ceferino, L., Mitrani-Reiser, J., Kiremidjian, A., Deierlein, G., Bambarén, C., 2020. Effective plans for hospital system response to earthquake emergencies. Nature Communications 11(1), 1–12. https://www. nature .com/articles/s41467-020-18072-w

Chen, T.L., Lin, Z.H., 2021. Impact of land use types on the spatial heterogeneity of extreme heat environments in a metropolitan area. Sustainable Cities and Society 72, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103005

Eriksson, K., 2023. Organisational learning without fire? Risk analyses as a basis for developing crisis management capabilities. Safety Science 163, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106144

Fabozzi, S., Porchia, A., Fierro, T., Peronace, E., Pagliaroli, A., Moscatelli, M., 2020. Seismic compression susceptibility in dry loose sandy and silty soil in a seismic microzonation perspective. Engineering Geology 264, 105324. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105324.

Faturechi, R., Miller-Hooks, E., 2015. Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: a comprehensive review. Journal of Infrastructure Systems 21(1), 1–13. https://doi.org/ 10. 1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000212

Gargiulo, C., Guida, C., 2026. Climate-proofing cities: a focus on vulnerability indices. International Planning Studies, 1–19. https://doi.org/10.1080/13563475.2026.2620774

Ghazanfar Pour, H., Hosseinekhah, H., Kamali, E., 2023. The analysis of risk and vulnerability Seismic of human settlements in Basht County using fuzzy Dimatel and ArcGIS. Journal of Natural Environmental Hazards 12(35), 21-36. (In Persian). https:// doi:10.22111/jneh.2022.39945.1845.

La Rosa, D., Martinico, F., 2013. Assessment of hazards and risks for landscape protection planning in Sicily. Journal of Environmental Management 127, S155–S167. https://doi.org/ 10.1016/ j.jenvman. 2013. 05. 015.

Li, D., Zhang, C., Pizzol, L., Critto, A., Zhang, H., Lv, S., Marcomini, A., 2014. Regional risk assessment approaches to land planning for industrial polluted areas in China: The Hulunbeier region case study. Environment International 65, 16–32. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.004

Li, Y., 2019. A unified landslide classification system for loess slopes: a critical review. Geomorphology 340, 67–83. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.020

Mahmoudzadeh, H., PouyanJam, A. and AsagharZadeh, S., 2020. Spatial Analysis of the Protected Zone and Vulnerability of Urban Facilities in Mashhad to Useful Airstrikes, from a Passive Security Viewpoint. Journal of Geography and Environmental Hazards 8(4), 191-203. (In Persian). https://doi: 10.22067/ geo. v0i0. 82738

Majd-bavi, A., 2021. Landslide susceptibility zonation in Shahid Abbaspour Dam district. Journal of Geography and Environmental Hazards 10(1), 65-80. (In Persian). https://doi: 10.22067/ geoeh. 2021. 67029.0.

Naser, M.Z., Kodur, V., 2025. Vulnerability of structures and infrastructure to wildfires: a perspective into assessment and mitigation strategies. Natural Hazards 121(8), 9995–10015. https:// doi: 10.1007/s11069-025-07168-5

Pan, J., Wei, H., 2015. Blue Book of Cities in China: Annual Report on Urban Development of China No. 8. Social Sciences Academic Press.

Pasman, H., Reniers, G., 2014. Past, present and future of Quantitative Risk Assessment (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Planning (LUP). Journal of Loss Prevention in the Process Industries 28, 2–9. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.03.004.

Patel, N., Singh, V.P., Ahamad, M.N., 2026. Seismic microzonation: a comprehensive summary of principle, practices and case studies of Indian cities. Indian Geotechnical Journal 56(5), 2601–2642. https://doi.org/10.1007/s40098-025-01298-0

Poudel, S., Bista, S., Bhattarai, S., Sharma, S., Talchabhadel, R., 2026. Understanding multi-hazard risk for US coastal cities. International Journal of Disaster Risk Reduction, 106023. https://doi.org/ 10.1016/ j.ijdrr.2026.106023

Rahmani, G., Chitsazan, M. and Ghafouri, H., 2022. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models. Advanced Applied Geology 12(2), 259-275. (In Persian). https://doi: 10.22055/aag.2021.36217.2190.

Roy, A., Ryu, K.R., Shahandashti, M., 2026. Quantitative risk assessment of road networks subject to natural hazards: A state-of-the-art review. Journal of Structural Design and Construction Practice 31(2), 03125008. https://doi.org/10.1061/JSDCCC.SCENG-1812

Salahshur, Z., Ahmadian, M.A., and Alizadeh, K., 2022. Assessing the vulnerability of urban infrastructures with a passive defense approach (case study: Shirvan city). Geography 20(72), 137-153. (In Persian). https://sid.ir/paper/953085/fa

Samadi, A., Shahmari Ardjani, R., Pourshikhian, A., Hosnimehr, S. S., and Asghari, H., 2024. Assessing the level of vulnerability of urban areas against the earthquake crisis using weighted overlap technique and RADIUS model (case study: Ardabil city). Geography and Planning 28(90), 323-348. (In Persian). https://doi.org/10.22034/gp.2024.58990.3198

Siyami, Q., Latifi, G., Taghinejad, K., Zahedi Kalaki, E., 2013. Defensive pathology of urban structure using AHP and GIS: A case study of Gorgan. Journal of Space Geographical Planning 3 (10), 21-42. https://gps.gu.ac.ir/article_7382.html

Smith, K., Fearnley, C.J., Dixon, D., Bird, D. K., Kelman, I., 2023. Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351261647

Sridhar, C. N., Subramani, T., Divya, P., Huang, Z., 2026. Sources of geogenic groundwater fluoride and associated health hazards in Pambar River basin of south India. Environmental Research 296, 124407. https://doi.org/10.1016/j.envres.2026.124407.

Wang, Y., Li, J., Ma, T., Xie, X., Deng, Y., Gan, Y., 2021. Genesis of geogenic contaminated groundwater: As, F and I. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 51(24), 2895–2933. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807452.

Zhao, M., Liu, X., 2016. Regional risk assessment for urban major hazards based on GIS geoprocessing to improve public safety. Safety Science 87, 18–24. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.013.

Zona, R., Imani, H., Losco, S., Modano, M., Minutolo, V., 2025. Fast evaluation of seismic vulnerability of RC building: a proposal of micro-zoning procedure for safety assessment. Natural Hazards, 1–19. https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-025-07729-8.