

Original Article

Qualitative Assessment of the Vulnerability of Buildings in Roshdiyeh Town of Tabriz in Terms of Resilience During Earthquakes

Amir Bakhshizadeh¹, Akbar Abdollahzadeh Taraf^{2*}, NoorMohammad Monjazi³

1. Department Urban Planning, Ahv.C, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Department of Architect and Urban Planning, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

3. Department of Urban Planning, Jundishapur University of Technology, Dezful, Dezful, Iran.

Abstract

Introduction: Tabriz, as one of the major metropolises in Iran with a long history of destructive earthquakes, is a prominent example of cities prone to seismic hazards due to its location on active fault lines. This city, particularly in its northern and eastern areas, lies on the North Tabriz Fault. At the same time, rapid urban growth, high population density, and unsustainable development have exacerbated challenges related to earthquake risk management. One of the key areas in Tabriz with high seismic importance is the Roshdiyeh neighborhood. As a developed area with diverse urban structures, Roshdiyeh features a mix of concrete, steel, and masonry buildings. However, a significant portion of these structures, especially masonry buildings, have not been adequately retrofitted, significantly increasing the seismic vulnerability of the region. This study's problem statement is based on the premise that many buildings in Roshdiyeh are highly vulnerable to moderate to severe earthquakes due to their location on the Tabriz fault. This vulnerability threatens the safety and lives of residents and could lead to socio-economic collapse and widespread urban disruptions. The lack of accurate and documented data on the vulnerability of buildings in the region adds further challenges for urban managers and planners in developing risk reduction and retrofitting policies.

Materials and Methods: This study employed an analytical-descriptive approach using the ARIA method to assess the seismic vulnerability of buildings in the Roshdiyeh neighborhood of Tabriz. The area was selected as the case study due to its location on the North Tabriz Fault and the diversity of its constructions. Data were collected through field observations, structural assessments, and completion of standard ARIA checklists. Variables such as soil type, structural system, building height, and plan irregularities were analyzed based on earthquake intensities of 7, 8, and 9 on the Mercalli scale, and a damage index (LR) was calculated for each building. Data analysis using statistical tools and GIS provided seismic vulnerability zoning maps for various earthquake intensities. The results indicate that masonry buildings without reinforcements showed the highest vulnerability, while concrete buildings with shear walls exhibited the least damage. Expert opinions from earthquake and structural engineering specialists validated the findings. This comprehensive study serves as a tool to identify seismic vulnerabilities and proposes solutions such as retrofitting buildings, adhering to construction standards, and planning for emergency response. It represents a significant step toward reducing earthquake risks and enhancing urban safety in Roshdiyeh, Tabriz.

Results and Discussion: The study found that masonry buildings without reinforcements exhibit the highest seismic vulnerability in Roshdiyeh, and they are likely to undergo total collapse in severe earthquakes (Mercalli 9). Steel buildings without bracing also demonstrated considerable vulnerability due to design flaws. Conversely, concrete buildings with shear walls performed well under seismic forces, showing the lowest vulnerability levels. The analysis revealed that buildings with horizontal and vertical reinforcements, while better than unreinforced masonry structures, remain vulnerable to severe earthquakes and require retrofitting. Steel buildings with bracing showed better performance and lower damage indices. Seismic vulnerability zoning delineated a high concentration of vulnerable buildings in specific areas of Roshdiyeh, especially in older neighborhoods, constituting a substantial threat to life safety and property loss. The findings underscore the need for retrofitting masonry and steel buildings, adhering to seismic standards for new constructions, establishing emergency infrastructure in high-risk zones, and implementing precise planning to mitigate earthquake risks.

Conclusion: The study concluded that unreinforced masonry and steel buildings without bracing in Roshdiyeh, Tabriz, have the highest seismic vulnerability and face a high risk of collapse in severe earthquakes. In contrast, concrete buildings with shear walls demonstrated superior seismic performance attributable to their inherent ductility and lateral load-resisting system. The concentration of vulnerable buildings in densely populated areas creates serious challenges for crisis management. Retrofitting existing buildings, enforcing seismic standards, establishing emergency facilities, and urban planning are critical measures to reduce vulnerability. Emphasizing resilient structural design and sustainable development is essential to enhance the region's safety and resilience.

Keywords: Population density, earthquake-prone area, natural hazards, masonry buildings, retrofitting, Tabriz city.

Citation: Bakhshizadeh, A., Abdollahzadeh Tarf, A., Monjazi, N. M. (2026). Qualitative assessment of the vulnerability of buildings in Roshdiyeh town of Tabriz in terms of resilience during earthquakes. *Sustainable Development of Geographical Environment*, Vol. 8, No.16, (106-122).

Received:23/12/2024

Revised:15/10/2025

Accepted:14/03/2025

* Corresponding Author's Email: 1378272707@iaui.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی کیفی آسیب پذیری ساختمان های شهرک رشدیه تبریز به لحاظ تاب آوری در زمان زلزله

امیر بخشی زاده^۱، اکبر عبدالله زاده طرف^{۲*}، نورمحمد منجزی^۳

۱. گروه شهرسازی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۳. گروه شهرسازی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

چکیده

مقدمه: تبریز، یکی از مهم ترین کلان شهرهای ایران، با تاریخچه ای طولانی از زلزله های مخرب، نمونه ای برجسته از شهرهایی است که به دلیل قرارگیری بر روی گسل های فعال، در معرض خطرات لرزه ای قرار دارد. این شهر، به ویژه در بخش های شمالی و شرقی، بر گسل شمال تبریز واقع شده و در عین حال، به دلیل رشد سریع شهری، تراکم جمعیتی بالا و توسعه ناپایدار، با چالش های متعددی در زمینه مدیریت ریسک زلزله مواجه است. یکی از مناطق کلیدی تبریز که به لحاظ لرزه ای بسیار مهم است، شهرک رشدیه است. رشدیه، به عنوان یک منطقه توسعه یافته با ساختار شهری متنوع، از ترکیبی از ساختمان های بتنی، فولادی و بنایی برخوردار است؛ اما متأسفانه، بخش قابل توجهی از این سازه ها، به ویژه ساختمان های بنایی، فاقد سیستم های مقاوم سازی مناسب هستند و این موضوع، سطح آسیب پذیری لرزه ای منطقه را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. مسئله تحقیق حاضر بر این اساس تعریف می شود که بسیاری از ساختمان های رشدیه، به دلیل استقرار بر بستر گسل تبریز در صورت وقوع زلزله ای با شدت متوسط یا شدید، به شدت آسیب پذیر هستند. این امر نه تنها تهدیدی جدی برای ایمنی و جان ساکنان منطقه است، بلکه می تواند به فروپاشی اجتماعی-اقتصادی و اختلالات گسترده شهری منجر شود. نبود اطلاعات دقیق و مستند درباره وضعیت آسیب پذیری ساختمان های منطقه، چالشی مضاعف برای مدیران شهری و برنامه ریزان در تدوین سیاست های کاهش ریسک و مقاوم سازی ایجاد کرده است.

مواد و روش ها: این پژوهش با رویکرد تحلیلی-توصیفی و استفاده از روش آریا، به ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمان های منطقه رشدیه تبریز پرداخته است. منطقه رشدیه به دلیل قرارگیری بر روی گسل شمالی تبریز و تنوع در نوع ساخت و سازها به عنوان نمونه انتخاب شد. داده ها از طریق مشاهدات میدانی، بررسی سازه ها و تکمیل چک لیست های استاندارد جمع آوری شدند. شاخص هایی مانند نوع خاک، سیستم سازه ای، ارتفاع ساختمان و نامنظمی پلان با توجه به شدت زلزله های ۷، ۸ و ۹ مرکالی تحلیل شده و شاخص خسارت (Lr) برای هر ساختمان محاسبه شد. تحلیل داده ها با ابزارهای آماری و GIS، نقشه های پهنه بندی آسیب پذیری را برای شدت های مختلف زلزله ارائه کرد. برای اعتبارسنجی نتایج، از مشاوره متخصصان زلزله، مهندسی سازه و مدیران شهری استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج این پژوهش نشان داد که ساختمان های بنایی بدون کلاف بیشترین آسیب پذیری لرزه ای را در منطقه رشدیه تبریز دارند و در زلزله های شدید (۹ مرکالی) به احتمال زیاد دچار تخریب کامل می شوند. ساختمان های فولادی بدون مهاربند نیز به دلیل نقص در طراحی سازه ای، آسیب پذیری قابل توجهی دارند. در مقابل، ساختمان های بتنی با دیوار برشی کمترین آسیب پذیری را نشان داده و عملکرد مناسبی در برابر نیروهای لرزه ای دارند. تحلیل داده ها نشان داد که ساختمان های با کلاف افقی و قائم، اگرچه وضعیت بهتری نسبت به ساختمان های بنایی بدون کلاف دارند، اما همچنان در برابر زلزله های شدید آسیب پذیر هستند و نیازمند مقاوم سازی هستند. ساختمان های فولادی با مهاربند نیز به دلیل طراحی مناسب تر، شاخص خسارت کمتری داشتند. نتایج پهنه بندی آسیب پذیری لرزه ای نشان داد که تراکم بالای ساختمان های آسیب پذیر در مناطق خاص رشدیه، به ویژه در بافت های قدیمی، خطرات جدی برای جان و مال ساکنان ایجاد می کند. این مطالعه بر لزوم مقاوم سازی ساختمان های بنایی و فولادی، رعایت استانداردهای لرزه ای در ساخت و سازهای جدید، ایجاد زیرساخت های امدادی در مناطق پرخطر و برنامه ریزی دقیق برای کاهش خطرات زلزله تأکید دارد.

نتیجه گیری: تمرکز ساختمان های آسیب پذیر در مناطق پرتراکم، چالش های جدی برای مدیریت بحران ایجاد می کند. مقاوم سازی ساختمان های موجود، رعایت استانداردهای لرزه ای، ایجاد زیرساخت های امدادی و برنامه ریزی شهری از جمله راهکارهای کاهش آسیب پذیری است. توجه به طراحی سازه ای و توسعه پایدار برای افزایش ایمنی و تاب آوری منطقه ضروری است. این مطالعه، ابزاری جامع برای شناسایی آسیب پذیری های لرزه ای و ارائه راهکارهایی مانند مقاوم سازی ساختمان ها، رعایت استانداردهای ساخت و ساز و برنامه ریزی امدادی فراهم کرده و گامی مؤثر در راستای کاهش خطرات زلزله و ارتقای ایمنی شهری در رشدیه تبریز است.

واژه های کلیدی: آسیب پذیری لرزه ای، روش آریا، ساختمان های بنایی، مقاوم سازی، رشدیه تبریز، پایداری.

استناد: بخشی زاده، ا.، عبدالله زاده طرف، ا.، منجزی، ن. م. (۱۴۰۵). ارزیابی کیفی آسیب پذیری ساختمان های شهرک رشدیه تبریز به لحاظ تاب آوری در زمان زلزله. توسعه پایدار محیط جغرافیایی، دوره ۸، شماره ۱۶، بهار ۱۴۰۵، (۱۰۶-۱۲۲).

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳

* رایانامه نویسنده مسئول: 1378272707@iau.ir

مقدمه

پایداری شهری و ایمنی ساختمان‌ها در برابر مخاطرات طبیعی، به‌ویژه زلزله، یکی از موضوعات کلیدی در توسعه پایدار شهری محسوب می‌شود (Mohammadi Miverood et al, 2024). زلزله یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، می‌تواند تأثیرات عمیقی بر بافت شهری، زیرساخت‌ها و زندگی انسان‌ها داشته باشد. شهر تبریز، به دلیل قرارگیری بر روی گسل‌های فعال و تاریخچه‌ای طولانی از زلزله‌های ویرانگر، نمونه‌ای برجسته از مناطقی است که نیازمند ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و برنامه‌ریزی مناسب برای کاهش خسارات احتمالی است (Silva et al, 2023). تجربه نشان داده است که آسیب‌های ناشی از زلزله در مناطق شهری می‌تواند به فجایع انسانی، اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای منجر شود (Iervolino et al, 2023). به همین دلیل، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و شناسایی نقاط ضعف شهری از منظر لرزه‌ای، یکی از ضروری‌ترین اقدامات برای کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری شهری است (Maleki et al, 2022).

تبریز به دلیل قرارگیری بر روی گسل‌های فعال، در معرض خطرات لرزه‌ای قرار دارد. شهرک رشدیه ترکیبی از ساختمان‌های بتنی، فولادی و بنایی برخوردار است؛ اما متأسفانه، بخش قابل توجهی از این سازه‌ها، به‌ویژه ساختمان‌های بنایی، فاقد سیستم‌های مقاوم‌سازی مناسب هستند و این موضوع، سطح آسیب‌پذیری لرزه‌ای منطقه را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. مسئله تحقیق حاضر بر این اساس تعریف می‌شود که بسیاری از ساختمان‌های رشدیه، به دلیل استقرار بر روی گسل تبریز در صورت وقوع زلزله‌ای با شدت متوسط یا شدید، به شدت آسیب‌پذیر هستند. این پژوهش با استفاده از روش آریا^۱ به‌عنوان ابزاری تحلیلی-کیفی، امکان ارزیابی دقیق و جامع ساختمان‌ها از نظر آسیب‌پذیری لرزه‌ای را فراهم می‌کند. در این روش، شاخص‌های متعددی مانند نوع خاک، سیستم سازه‌ای، ارتفاع ساختمان و کیفیت اجرای مقاوم‌سازی در نظر گرفته شده و ساختمان‌ها بر اساس میزان آسیب‌پذیری طبقه‌بندی می‌شوند. ضرورت این تحقیق در سه بعد قابل توضیح است. اول، از منظر ایمنی شهری، منطقه رشدیه به دلیل تراکم بالای جمعیت و موقعیت استراتژیک خود، نیازمند ارزیابی دقیق و ارائه راه‌کارهای فوری برای کاهش ریسک زلزله است. دوم، از منظر برنامه‌ریزی شهری، نبود اطلاعات جامع و قابل اتکا درباره وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌های این منطقه، برنامه‌ریزان و مدیران شهری را در طراحی و اجرای سیاست‌های مقاوم‌سازی با چالش جدی مواجه کرده است. سوم، از منظر مدیریت بحران، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و برنامه‌ریزی بهتر برای مدیریت بحران و افزایش تاب‌آوری شهری استفاده شود. پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل کیفی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های شهرک رشدیه تبریز طراحی شده است و امیدوار است گامی مؤثر در راستای کاهش خطرات زلزله و ارتقای تاب‌آوری شهری بردارد.

در پژوهشی تحت عنوان «نمایه آسیب ساختمان‌ها در زمین‌لرزه‌های با شدت‌های ۷ تا ۹ بر اساس مقیاس MSK و نمودارهای ستونی و خطی برای PGA» ارائه شد. نتایج نشان داد که حدود ۳۰ درصد ساختمان‌های فولادی با قدمت کمتر از ۲۰ سال، در زمین‌لرزه با شدت ۸ احتمال آسیب زیاد و در شدت ۹ احتمال ریزش دارند. ساختمان‌های بتنی با قدمت کمتر از ۱۵ سال نیز در شدت ۸ احتمال آسیب متوسط و در شدت ۹ احتمال آسیب زیاد دارند، اما عملکرد کلی این سیستم بهتر از فولادی و بنایی است (Khajavy et al 2024).

در پژوهشی با استفاده از روش آریا، آسیب‌پذیری لرزه‌ای مدارس ایرانشهر را ارزیابی کردند. یافته‌ها نشان داد که ۹۰ درصد مدارس در زلزله MSK9 دچار فروریزش و ۸۱ درصد در زلزله MSK7 دچار خسارت متوسط می‌شوند. همچنین، ۸۴ درصد مدارس با دسترسی آسان، پتانسیل تبدیل به پایگاه امدادسانی را دارند، مشروط بر مقاوم‌سازی مناسب. این پژوهش بر اهمیت مقاوم‌سازی زیرساخت‌های شهری تأکید دارد (Yaghfoori et al 2024).

در پژوهشی با عنوان «نقشه جهانی خطر لرزه‌ای»، یک مدل جامع از خطر لرزه‌ای جهانی ارائه کردند. این نقشه ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران در سطح جهانی محسوب می‌شود و می‌تواند راهبردهای عملی برای کاهش خطرات زلزله ارائه دهد (Silva et al 2023).

در مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی‌های خطر بلایای طبیعی در مقیاس جهانی: مرور مقاله» به مرور روش‌های مختلف ارزیابی خطرات طبیعی پرداخته و نشان دادند که استفاده از داده‌های دقیق و مدل‌های جامع خطر می‌تواند مدیریت بحران را بهبود بخشد و اثرات بلایای طبیعی را کاهش دهد (Ward et al 2020).

به‌طور کلی، این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های پیشرفته و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها نقش کلیدی در کاهش خسارات لرزه‌ای ایفا می‌کند. این مطالعات، مبنای ارزشمندی برای توسعه راهبردهای مقاوم‌سازی و برنامه‌ریزی شهری به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز نظیر ایران بخصوص تبریز ارائه می‌دهند و ضرورت توجه به پژوهش‌های مشابه در سطوح محلی و منطقه‌ای را برجسته می‌کنند.

مفهوم آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها

آسیب‌پذیری لرزه‌ای به توانایی یا ناتوانی سازه‌ها در مقابله با نیروهای ناشی از زمین‌لرزه اطلاق می‌شود. این مفهوم تحت تأثیر عواملی نظیر مصالح ساختمانی، قدمت ساختمان، نوع طراحی سازه، موقعیت جغرافیایی و نزدیکی به گسل‌ها قرار دارد. در مناطق شهری، ترکیب تراکم جمعیت، استفاده‌های متنوع از زمین و ویژگی‌های کالبدی ساختمان‌ها پیچیدگی خاصی به این ارزیابی می‌بخشد (Xofi et al, 2024). عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای در محیط‌های شهری به صورت زیر هستند: موقعیت جغرافیایی و فاصله از گسل‌ها - نوع و کیفیت مصالح ساختمانی - طراحی و مهندسی سازه - بافت فرسوده و سکونتگاه‌های غیررسمی.

ابعاد آسیب‌پذیری لرزه‌ای در شهرها:

کالبدی - اجتماعی - اقتصادی و عملکردی

عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها

عوامل مختلفی بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله تأثیر دارند. از جمله این عوامل کیفیت مصالح، نوع طراحی و ویژگی‌های ساختاری ساختمان‌ها می‌باشد. ساختمان‌هایی که با مصالح قدیمی یا نامرغوب ساخته شده‌اند، به همین ترتیب، میزان رعایت استانداردهای مهندسی و قابلیت سازه برای جلوگیری از شکست‌های احتمالی تحت نیروهای لرزه‌ای در این ساختمان‌ها از عوامل تعیین‌کننده در میزان آسیب‌پذیری آن‌ها است (Ghazanfarpour et al., 2019; Abo-El-Ezz et al., 2023).

تأثیر موقعیت جغرافیایی بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای

ساختمان‌ها در مناطقی که نزدیکی بیشتری به گسل‌های فعال دارند، معمولاً آسیب‌پذیرتر هستند. به همین دلیل، ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در این مناطق نیاز به مدل‌های پیچیده‌تر و پیشرفته‌تری دارد که بتوانند تمامی این عوامل را در نظر بگیرند (Danciu et al., 2024; Xofi et al., 2023).

این موضوع در مناطقی که ساخت‌وسازها در نواحی نزدیک به گسل انجام شده‌اند، شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌ای باید انجام شود که بتواند رفتار سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه‌ها را پیش‌بینی کند (Silva et al., 2023). علاوه بر این، پیش‌بینی دقیق‌تر و به‌موقع خطرات در این مناطق می‌تواند به کاهش تلفات جانی و خسارات مالی کمک کند.

تأثیر بافت شهری و سکونتگاه‌های غیررسمی

بافت‌های شهری، به‌ویژه در مناطق توسعه‌نیافته و یا مناطقی که دارای سکونتگاه‌های غیررسمی هستند، در برابر زلزله آسیب‌پذیرتر هستند. این بافت‌ها معمولاً شامل ساختمان‌هایی می‌شوند که فاقد استانداردهای مهندسی و طراحی لرزه‌ای هستند و ممکن است از مصالح ضعیف و ناپایدار ساخته شوند.

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که بهبود و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و سازه‌ها در این مناطق می‌تواند به طور قابل توجهی آسیب‌پذیری را کاهش دهد. همچنین، تدوین استراتژی‌های مقاوم‌سازی برای این مناطق با استفاده از تکنولوژی‌های نوین می‌تواند به کاهش خطرات کمک کند. با این حال، بهسازی این نواحی نیازمند منابع مالی و زیرساخت‌های مناسب است که باید توسط دولت و نهادهای مختلف تأمین شود (Khajavy et al., 2024; Shirzad et al., 2023).

روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای

روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: کیفی و کمی. در روش‌های کیفی، ارزیابی‌ها معمولاً بر اساس داده‌های تجربی و ساده‌تر انجام می‌شود که می‌تواند به‌طور سریع و اولیه آسیب‌پذیری مناطق مختلف را شبیه‌سازی کند.

بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها

یکی از راه‌های کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای، بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و سازه‌ها است. بهسازی ساختمان‌های قدیمی و بافت‌های فرسوده می‌تواند در کاهش خسارات زلزله در مناطق شهری بسیار مؤثر باشد (Maleki et al., 2022; Mohaqeqi et al., 2021).

نقش آموزش و آگاهی‌رسانی در کاهش آسیب‌ها

آموزش و آگاهی‌رسانی در خصوص خطرات زلزله و نحوه مقابله با آن‌ها از ارکان اصلی کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله‌ها است. در این آموزش‌ها، به افراد نحوه آماده شدن برای زلزله، رفتارهای ایمن هنگام وقوع آن و روش‌های کمک‌های اولیه آموزش داده می‌شود (Li, 2024).

نوآوری این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین:

- اولین نوآوری این پژوهش، استفاده از روش‌های نوین در سنجش تاب‌آوری تک‌تک سازه‌های شهری در برابر زلزله می‌باشد. در چنین سنجشی برای هر سازه شهری به صورت اختصاصی میزان تاب‌آوری تعیین می‌گردد و بر اساس میزان تاب‌آوری هر سازه شهری، برنامه‌ریزی‌های لازم در قالب بهسازی و نوسازی تعیین می‌شود.
- نوآوری دوم مقاله حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین این است که در پژوهش‌های پیشین سنجش تاب‌آوری شهری در برابر زلزله بر اساس یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در رویکرد تلفیقی با GIS صورت گرفته است و نتیجه بدون توجه به شدت و بزرگی زلزله ارائه گردیده است. این مقاله با استفاده از روش‌های نوین این مشکل را حل نموده و نتایج نزدیک به نتایج دنیای واقعی ارائه کرده است.
- نوآوری دیگر این تحقیق بهره‌گیری از رویکرد نوین بر پایه سناریو در راستای تاب‌آور نمودن محدوده مورد مطالعه در برابر زلزله‌های آتی است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

شهرک رشدیه، یکی از نواحی مهم مسکونی در شهر تبریز واقع در استان آذربایجان شرقی است. رشدیه در شمال شرقی تبریز قرار دارد و از لحاظ دسترسی به مراکز تجاری، اداری و دیگر نقاط مهم شهر شرایط بسیار مناسبی دارد. این منطقه به دلیل ترکیبی از توسعه شهری، خدمات متنوع و کیفیت زندگی مطلوب، جایگاهی ویژه در میان مناطق شهری تبریز پیدا کرده است.



شکل ۱. موقعیت شهرک رشدیه روی گسل شمالی تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

روش پژوهش

روش تحقیق این پژوهش بر اساس رویکرد تحلیلی-توصیفی طراحی شده و به صورت ترکیبی از تحلیل کیفی و کمی به ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های منطقه رشدیه تبریز پرداخته است. در این روش چک‌لیست‌ها شامل شاخص‌هایی نظیر نوع خاک، سیستم سازه‌ای، شیب زمین، وضعیت بازشوها، ارتفاع ساختمان و نامنظمی در پلان بودند. این شاخص‌ها با توجه به شدت زلزله (۷، ۸ و ۹ مرکالی) امتیازدهی شدند و در نهایت شاخص خسارت برای هر ساختمان محاسبه شد (Danciu et al, 2024).

برای این کار ابتدا، لازم است که چک‌لیست‌هایی که برای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر زلزله استفاده شده‌اند، به طور دقیق معرفی شوند. علاوه بر این، باید اشاره شود که برای هر ساختمان، حداقل چند نفر از متخصصان مورد مشورت قرار گرفته‌اند تا صحت اطلاعات جمع‌آوری شده تأیید شود. امتیازدهی‌های نهایی بر اساس شدت زلزله (مقیاس مرکالی ۷، ۸ و ۹) انجام شد که برای هر ساختمان مطابق با شرایط جغرافیایی و ویژگی‌های سازه‌ای آن، امتیازهایی از ۰ تا ۵ یا ۰ تا ۱۰ به هر معیار اختصاص یافت. سپس این امتیازها جمع شده و ساختمان‌ها بر اساس میزان آسیب‌پذیری در برابر زلزله‌های مختلف به گروه‌های مختلف دسته‌بندی شدند: خسارت کم، خسارت متوسط، خسارت زیاد و احتمال ریزش. داده‌های به‌دست‌آمده از چک‌لیست‌ها با استفاده از ابزارهای تحلیل آماری و GIS تحلیل شدند. نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری برای هر شدت زلزله تهیه شد و ساختمان‌ها بر اساس میزان خسارت به چهار گروه با خسارت کم، متوسط، زیاد و احتمال ریزش طبقه‌بندی شدند (Ward et al, 2020).

در نهایت، ساختمان‌ها به چهار دسته خسارت کم، خسارت متوسط، خسارت زیاد و احتمال ریزش تقسیم می‌شوند. در خسارت کم ساختمان‌ها در برابر شدت‌های پایین زلزله آسیب ندیده یا آسیب بسیار کمی می‌بینند. خسارت متوسط شامل ساختمان‌هایی است که ممکن است در برابر زلزله‌های با شدت متوسط آسیب ببینند اما همچنان پایدار باقی می‌مانند. در خسارت زیاد ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های شدید آسیب زیادی می‌بینند. احتمال ریزش مربوط به ساختمان‌هایی است که احتمالاً در اثر زلزله‌های شدید دچار ریزش یا تخریب خواهند شد. پس از تکمیل امتیازدهی و طبقه‌بندی ساختمان‌ها، از ابزارهای GIS می‌توان برای تحلیل فضایی استفاده کرد و نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در مقیاس‌های مختلف ایجاد نمود. این نقشه‌ها به تفکیک شدت زلزله، نقاط آسیب‌پذیر در سطح منطقه را نشان خواهند داد. در این پژوهش برای افزایش دقت تحلیل و صحت داده‌ها، از مشورت و نظرات حداقل ۳ متخصص در زمینه زلزله،

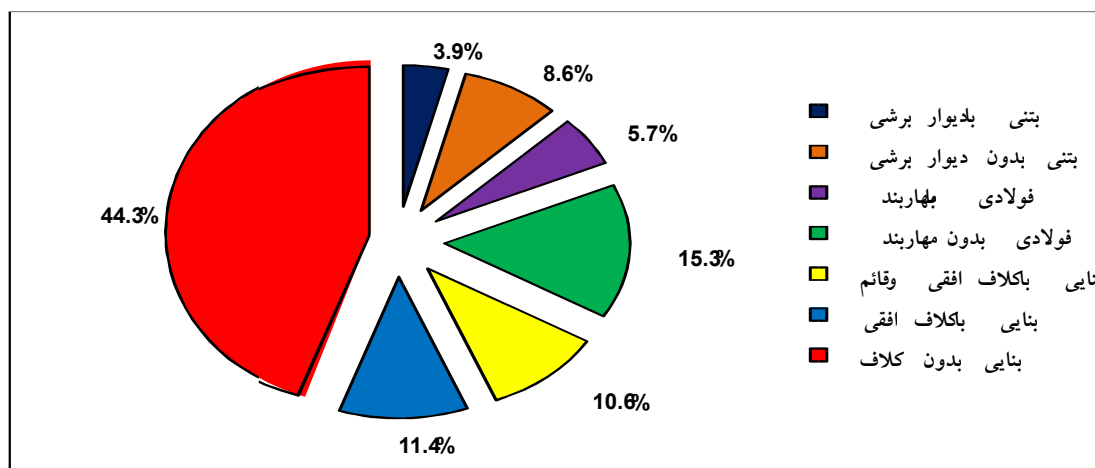
مهندسی سازه و برنامه‌ریزی شهری استفاده شد. اعتبارسنجی داده‌ها از طریق مقایسه نتایج با منابع معتبر و بازدیدهای چندباره میدانی انجام گرفت. این رویکرد جامع، ابزار مؤثری برای ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق زلزله‌خیز و ارائه پیشنهاداتی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و مدیریت بحران فراهم می‌کند.

نتایج و بحث

بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های رشدیه با روش آریا

کل ساختمان‌ها در شکل ۲ (۱) ارائه شده است. اطلاعات نشان می‌دهد که بیشترین تعداد ساختمان‌ها مربوط به گروه ساختمان‌های بنایی بدون کلاف است که سهم قابل توجهی از کل را به خود اختصاص داده است. جزئیات در جدول زیر آمده است:

این شکل توزیع ساختمان‌ها را بر اساس نوع سازه در منطقه رشدیه تبریز نشان می‌دهد. اطلاعات ارائه‌شده برای تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای و برنامه‌ریزی‌های آتی جهت مقاوم‌سازی بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۲. درصد ساختمان‌ها با گروه‌های ساختمانی مختلف در رشدیه تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

با توجه به شکل ۲، ۲۵۵ ساختمان بر اساس نوع مصالح و سیستم سازه‌ای به هفت گروه تقسیم‌بندی شدند. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین سهم ساختمان‌ها، با تعداد ۱۱۳ واحد (۴۴/۳)، متعلق به گروه ساختمان‌های بنایی بدون کلاف است. این ساختمان‌ها به دلیل نداشتن کلاف‌بندی مناسب، در برابر زمین‌لرزه آسیب‌پذیری بالایی دارند. ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند نیز با ۳۹ واحد (۱۵/۳) در رتبه دوم قرار دارند. این نوع سازه‌ها، به‌ویژه در صورت عدم مهاربندی، در معرض خطر لرزه‌ای متوسط تا زیاد هستند. در مقابل، ساختمان‌های بتنی با دیوار برشی، با تعداد ۱۰ واحد (۳/۹)، کم‌ترین سهم را داشته و به دلیل طراحی مقاوم‌تر، از آسیب‌پذیری کمتری برخوردارند. ساختمان‌های بنایی با کلاف افقی و قائم، با تعداد ۲۷ واحد (۱۰/۶)، وضعیت بهتری نسبت به ساختمان‌های بنایی بدون کلاف دارند اما همچنان در زلزله‌های شدید ممکن است آسیب‌پذیر باشند. ساختمان‌های بتنی بدون دیوار برشی (۲۲ واحد، ۸/۶) و فولادی با مهاربند (۱۵ واحد، ۵/۷) نیز در میان گروه‌های دیگر جایگاه میانی دارند. این تحلیل نشان می‌دهد که ساختمان‌های بنایی، به‌ویژه آن‌هایی که فاقد کلاف هستند، بیش‌ترین آسیب‌پذیری را دارند و باید در اولویت مقاوم‌سازی قرار گیرند. اطلاعات به‌دست‌آمده برای برنامه‌ریزی جهت کاهش خطرات زلزله و مقاوم‌سازی بافت‌های شهری منطقه بسیار ارزشمند است.

بررسی آسیب‌پذیری کیفی یک نمونه ساختمان در رشدیه

در این بخش، به‌عنوان نمونه، آسیب‌پذیری کیفی لرزه‌ای یک ساختمان واقع در شهرک رشدیه تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختمان از نوع بنایی است که فاقد کلاف افقی و قائم بوده و برای استفاده مسکونی در حال بهره‌برداری

است. با توجه به ویژگی‌های سازه‌ای و محیطی، این ساختمان در برابر زلزله‌های احتمالی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج در قالب جدول زیر ارائه شده است. اطلاعات این ساختمان در جدول ۱ آمده شده است. در این ارزیابی، ساختمان بنایی مورد بررسی با استفاده از روش آریا و تحلیل پارامترهای مختلف لرزه‌ای ارزیابی شد. جدول زیر شاخص‌های ارزیابی و مقدار آن‌ها در شدت‌های مختلف زلزله را نمایش می‌دهد. ساختمان در زلزله‌های با شدت ۷، ۸ و ۹ مرکالی از نظر شاخص‌های کلیدی مانند نوع خاک، سیستم سازه‌ای و کیفیت کلی مورد تحلیل قرار گرفت.

جدول ۱. نمونه‌ای از چک‌لیست تکمیل شده روش آریا برای یک ساختمان بنایی در رشدیه (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

ردیف	شاخص	شرح پارامتر	مقدار در شدت‌های مختلف زلزله			توضیحات
			۷ مرکالی	۸ مرکالی	۹ مرکالی	
۱	L1	شیب زمین کمتر از ۱۵ درجه	۱	۱	۱	زمین پایدار و بدون لغزش
۲	L2	خاک تیپ III نرم	۱/۱	۱/۲	۱/۳	خاک با مقاومت کم‌تر در برابر لرزه
۳	L3	سیستم سازه‌ای بنایی بدون کلاف	۱/۵	۳	۴	مقاومت کم در برابر زلزله
۴	L4	طاق ضربی با تکیه‌گاه نامناسب	۲	۳	۴	ضعف در سیستم کف طبقات
۵	L5	ارتفاع ساختمان (یک طبقه)	۱	۱	۱	ارتفاع کم، آسیب‌پذیری پایین
۶	L6	بازشوها (مطابق مبحث ۸)	۱	۱	۱	بازشوهای ایمن
۷	L7	پیش‌آمدگی‌ها	۰	۰	۰	فاقد پیش‌آمدگی
۸	L8	پلان منظم و بدون شکستگی	۱	۱	۱	طراحی پلان مطلوب
۹	L9	نمای سیمان سفید	۰	۰	۰	نمای غیرمقاوم
۱۰	L10	کیفیت ساختمان	۰/۸	۰/۸	۰/۸	کیفیت متوسط
۱۱	F3	روکش نما	۰/۶	۰/۶	۰/۶	مقاومت متوسط نمای خارجی
۱۲	F4	پیش‌آمدگی مناسب	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۷	پیش‌آمدگی کم‌ریسک
۱۳	F7	مقاومت جزئیات	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	جزئیات با مقاومت کم
۱۴	F9	ثبات نما	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	نمای ناپایدار
		شاخص خسارت (LR)	۰/۳۶	۰/۷	۱/۰۰	تخریب متوسط تا کامل

با توجه به بررسی انجام شده:

- در شدت زلزله ۷ مرکالی: ساختمان دچار خسارت متوسط ($LR=0.36$) می‌شود که نیاز به تعمیرات اساسی دارد.
 - در شدت زلزله ۸ مرکالی: میزان خسارت به سطح بالا می‌رسد ($LR=0.70$) و مقاوم‌سازی الزامی است.
 - در شدت زلزله ۹ مرکالی: ساختمان به‌طور کامل تخریب می‌شود ($LR=1.00$) و بازسازی کامل ضروری است.
- ساختمان مورد بررسی در منطقه رشدیه، نمونه‌ای از ساختمان‌های بنایی فاقد کلاف افقی و قائم است که به دلیل ویژگی‌های سازه‌ای خود، آسیب‌پذیری بالایی در برابر زلزله دارد. این ساختمان به‌عنوان یک واحد مسکونی در حال بهره‌برداری است و با توجه به شرایط خاک تیپ II و زمین نسبتاً پایدار، از نظر موقعیت جغرافیایی خطر لغزش کمی دارد. با این حال، مصالح و طراحی سازه‌ای آن باعث شده است که در برابر نیروهای لرزه‌ای مقاومت کافی نداشته باشد. ویژگی‌های سازه‌ای مانند استفاده از طاق ضربی با تکیه‌گاه نامناسب و نمای سیمان ساده، باعث افزایش احتمال ریزش در شدت‌های بالای زلزله می‌شود. در شدت زلزله ۷ مرکالی، این ساختمان خسارت متوسطی را تجربه می‌کند که نیاز به تعمیرات جدی دارد؛ اما در شدت ۸ مرکالی، میزان خسارت به حدی می‌رسد که مقاوم‌سازی فوری الزامی می‌شود. در نهایت، در شدت ۹ مرکالی، ساختمان احتمالاً به‌طور کامل تخریب شده و نیاز به بازسازی کامل خواهد داشت. علاوه بر این، طراحی پلان منظم ساختمان به عنوان یک ویژگی مثبت می‌تواند تا حدودی از شدت آسیب‌ها بکاهد، اما کافی نیست. کیفیت کلی ساختمان در حد متوسط ارزیابی شده و این نشان می‌دهد که برای کاهش آسیب‌پذیری نیاز به بهبودهای اساسی وجود دارد. برای بهسازی این نوع ساختمان‌ها، اضافه کردن کلاف‌بندی افقی و قائم، تقویت سازه کف و استفاده از مصالح مقاوم‌تر در نما و سازه الزامی است. هم‌چنین، رعایت استانداردهای طراحی لرزه‌ای باید به عنوان یک اصل ضروری در ساخت‌وسازهای آینده در مناطق زلزله‌خیز مانند رشدیه مدنظر قرار گیرد. این تحلیل نشان می‌دهد

که علاوه بر مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، طراحی شهری با محوریت کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش خطرات زلزله داشته باشد.

تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های رشدیه

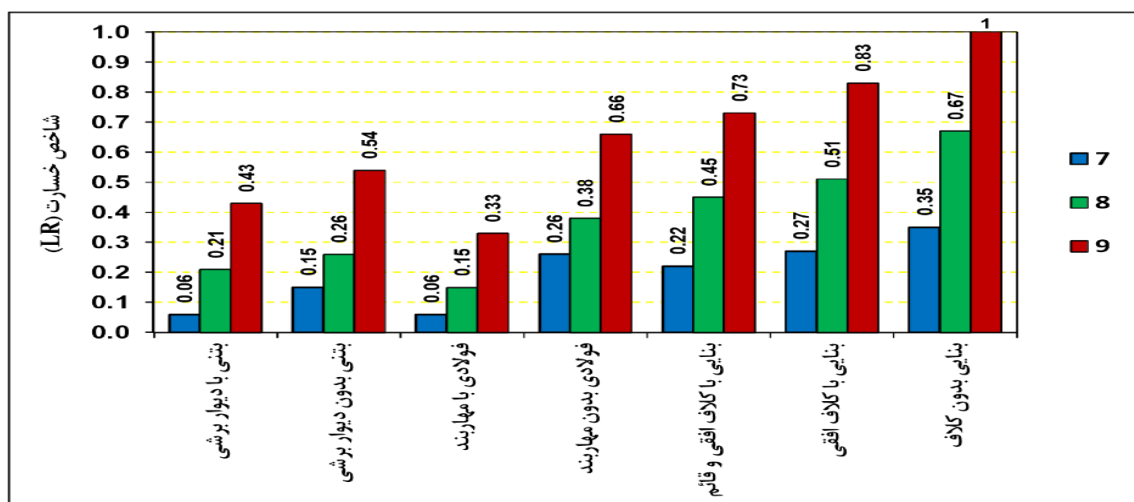
پس از بررسی میدانی و تکمیل چک‌لیست‌های روش آریا و نسخه تکمیل‌شده آن برای ۲۵۵ ساختمان واقع در منطقه رشدیه تبریز، شاخص خسارت لرزه‌ای (LR) ساختمان‌ها در سه سطح شدت زلزله ۷، ۸ و ۹ مرکالی محاسبه شد. این تحلیل، وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌های منطقه را به تفکیک نوع سازه و مصالح به صورت علمی و جامع ارزیابی کرده است. جدول زیر متوسط شاخص خسارت هر گروه ساختمانی را نشان می‌دهد. در جدول (۲)، متوسط شاخص خسارت ساختمان‌های این منطقه به تفکیک گروه‌های ساختمانی ارائه گردیده است.

جدول ۲. متوسط شاخص خسارت (LR) ساختمان‌های رشدیه به تفکیک گروه ساختمانی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

ردیف	گروه ساختمانی	زلزله ۷ مرکالی	زلزله ۸ مرکالی	زلزله ۹ مرکالی
۱	بتنی با دیوار برشی	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۴۳
۲	بتنی بدون دیوار برشی	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۵۴
۳	فولادی با مهاربند	۰/۰۶	۰/۱۵	۰/۳۳
۴	فولادی بدون مهاربند	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۶۶
۵	بنایی با کلاف افقی و قائم	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۷۳
۶	بنایی با کلاف افقی	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۸۳
۷	بنایی بدون کلاف	۰/۳۵	۰/۶۷	۱/۰۰

با توجه به جدول ۲ نتایج زیر حاصل شد:

- ساختمان‌های بتنی با دیوار برشی: این گروه با شاخص خسارت ۰/۰۶ در زلزله ۷ مرکالی و ۰/۴۳ در زلزله ۹ مرکالی، کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری را در میان ساختمان‌ها نشان داده‌اند. طراحی مناسب و وجود دیوار برشی نقش مؤثری در کاهش خسارات داشته و این گروه به‌عنوان نمونه‌ای مطلوب برای ساخت‌وساز ایمن مطرح است.
- ساختمان‌های بنایی بدون کلاف: این نوع ساختمان‌ها، با شاخص خسارت ۱/۰۰ در زلزله ۹ مرکالی، بیش‌ترین آسیب‌پذیری را دارند. عدم وجود کلاف‌بندی افقی و قائم در این ساختمان‌ها به شدت ایمنی را کاهش داده و تخریب کامل در زلزله‌های شدید را محتمل می‌کند.
- ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند: شاخص خسارت ۰/۶۶ در زلزله ۹ مرکالی نشان‌دهنده آسیب‌پذیری قابل توجه این ساختمان‌ها است. ضعف در مهاربندی و طراحی سازه‌ای، این گروه را به‌ویژه در برابر زلزله‌های متوسط و شدید آسیب‌پذیر کرده است.
- ساختمان‌های بنایی با کلاف افقی و قائم: هرچند این ساختمان‌ها نسبت به ساختمان‌های بنایی بدون کلاف وضعیت بهتری دارند، اما همچنان شاخص خسارت ۰/۷۳ در زلزله ۹ مرکالی نشان دهند لزوم مقاوم‌سازی است.
- ساختمان‌های فولادی با مهاربند: این گروه با شاخص خسارت ۰/۳۳ در زلزله ۹ مرکالی، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند دارند، اما هنوز نیازمند بهبودهایی در طراحی و اجرای مهاربندی هستند.
- ساختمان‌های بنایی با کلاف افقی: این ساختمان‌ها در شدت‌های مختلف زلزله آسیب‌پذیری بالایی نشان داده‌اند. شاخص خسارت ۰/۸۳ در زلزله ۹ مرکالی تأکید بر ضرورت مقاوم‌سازی این گروه دارد.



شکل ۳. متوسط شاخص خسارت ساختمان‌های رشدیه تبریز به تفکیک گروه ساختمانی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جداول ۲ و شکل ۳ در برداشت‌های میدانی و تحلیل به روش آریا، ساختمان‌ها به چهار گروه طبقه‌بندی شدند که عبارت‌اند از:

تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های رشدیه

• ساختمان‌های با خسارت کم و نیاز به تعمیر جزئی

ساختمان‌هایی که شاخص خسارت آن‌ها کمتر از ۰/۲۵ است در این گروه قرار دارند. در زلزله با شدت ۷ مرکالی، ساختمان‌های بتنی با دیوار برشی و فولادی با مهاربند، کم‌ترین شاخص خسارت (۰/۰۶) را داشتند. ساختمان‌های بتنی بدون دیوار برشی و بنایی با کلاف افقی و قائم نیز با شاخص خسارت ۰/۱۵ و ۰/۲۲ در این دسته جای می‌گیرند. در مجموع، ۸۰ ساختمان (۲۸/۶ درصد از کل) در این منطقه نیاز به تعمیرات جزئی دارند. در شدت ۸ مرکالی، تنها ۲۷ ساختمان (۹/۶ درصد) همچنان در این دسته قرار می‌گیرند و در شدت ۹ مرکالی، هیچ ساختمانی با خسارت کم مشاهده نمی‌شود.

• ساختمان‌های با خسارت متوسط و نیاز به تعمیر و مرمت زیاد

این گروه شامل ساختمان‌هایی با شاخص خسارت بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ است. در زلزله ۷ مرکالی، ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند، بنایی با کلاف افقی و بنایی بدون کلاف با شاخص خسارت به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۲۷ و ۰/۳۵، نیازمند تعمیرات اساسی هستند. این گروه ۱۹۹ ساختمان (۷۱/۴ درصد) از کل منطقه را شامل می‌شود. در شدت ۸ مرکالی، ساختمان‌های بتنی بدون دیوار برشی، فولادی بدون مهاربند و بنایی با کلاف افقی و قائم، با شاخص خسارت ۰/۲۶، ۰/۳۸ و ۰/۴۵، در این دسته قرار می‌گیرند و مجموعاً ۹۶ ساختمان (۳۴/۴ درصد) را شامل می‌شوند. در شدت ۹ مرکالی نیز ساختمان‌های فولادی با مهاربند و بتنی با دیوار برشی در این دسته قرار گرفته و در مجموع ۲۷ ساختمان (۹/۶ درصد) را در برمی‌گیرند.

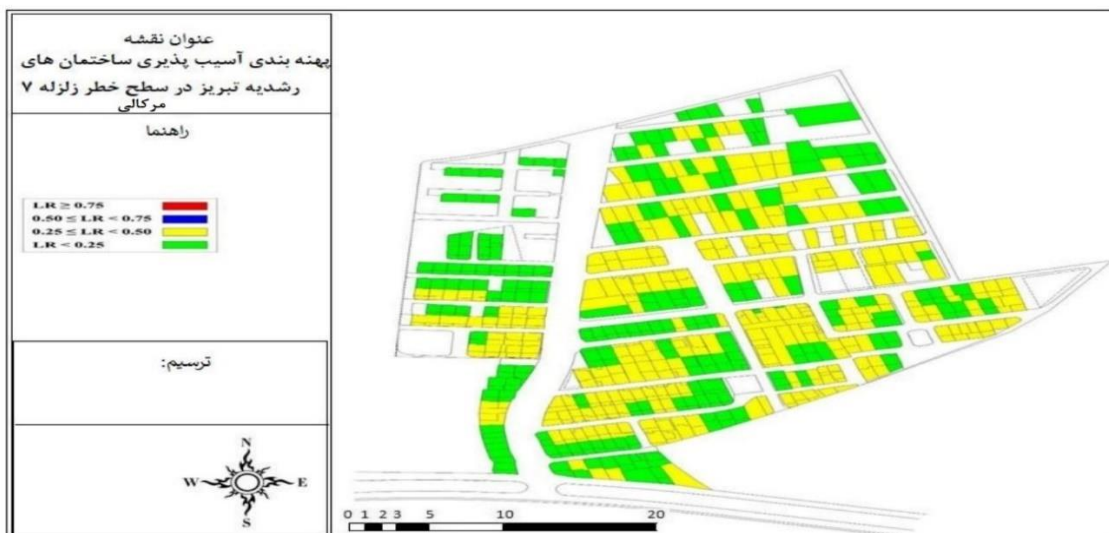
• ساختمان‌های با خسارت زیاد و نیاز به بازسازی و مقاوم‌سازی الزامی

ساختمان‌هایی با شاخص خسارت بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ در این گروه قرار دارند. در شدت ۸ مرکالی، ساختمان‌های بنایی با کلاف افقی (۰/۵۱) و بدون کلاف (۰/۶۷) در این گروه جای می‌گیرند و مجموعاً ۱۵۶ ساختمان (۵۶ درصد) نیازمند بازسازی و مقاوم‌سازی هستند. در شدت ۹ مرکالی، ساختمان‌های بتنی بدون دیوار برشی (۰/۵۴)، فولادی بدون مهاربند (۰/۶۶) و بنایی با کلاف افقی و قائم (۰/۷۳) در این گروه قرار دارند و مجموعاً ۹۶ ساختمان (۳۴/۴ درصد) به بازسازی فوری نیاز دارند.

• ساختمان‌های با احتمال ریزش و نیاز به نوسازی

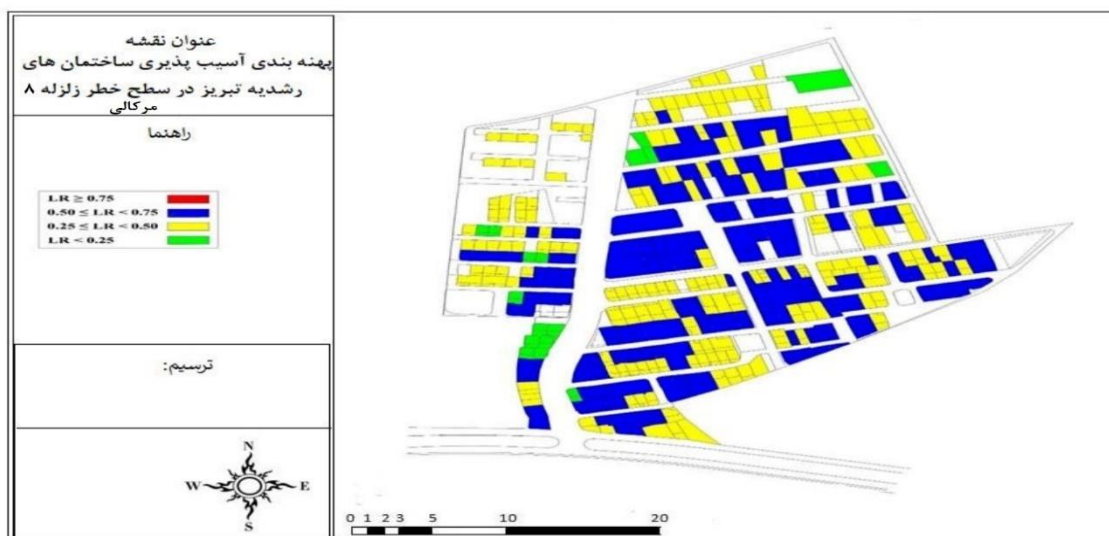
ساختمان‌هایی با شاخص خسارت بین ۰/۷۵ تا ۱، به‌ویژه در زلزله با شدت ۹ مرکالی، بیش‌ترین آسیب را متحمل می‌شوند. در این شدت، ساختمان‌های بنایی با کلاف افقی (۰/۸۳) و بدون کلاف (۱/۰۰)، با احتمال ریزش مواجه‌اند و مجموعاً

۱۵۶ ساختمان (۰/۵۶ درصد) از کل منطقه نیاز به نوسازی کامل دارند. در شدت‌های ۷ و ۸ مرکالی، هیچ ساختمانی در این گروه قرار نمی‌گیرد. در شکل (۴)، نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه در سطح خطر زلزله ۷ مرکالی نشان داده شده است.



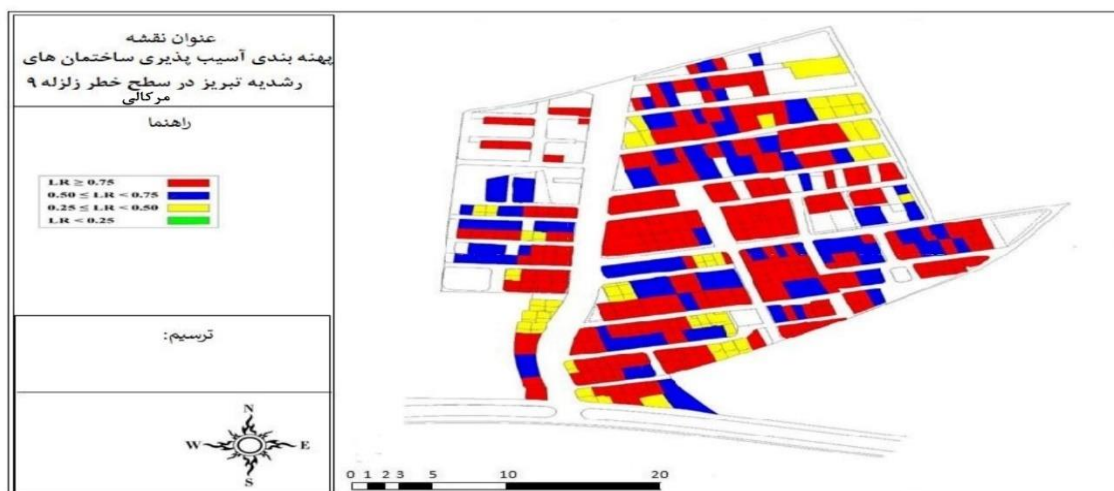
شکل ۴. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه تبریز در سطح خطر زلزله ۷ مرکالی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

در شکل (۵)، نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه در سطح خطر زلزله ۸ مرکالی نشان داده شده است.

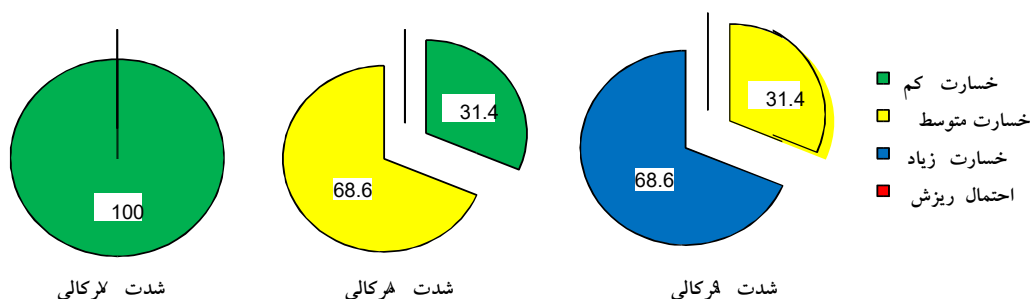


شکل ۵. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه تبریز در سطح خطر زلزله ۸ مرکالی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

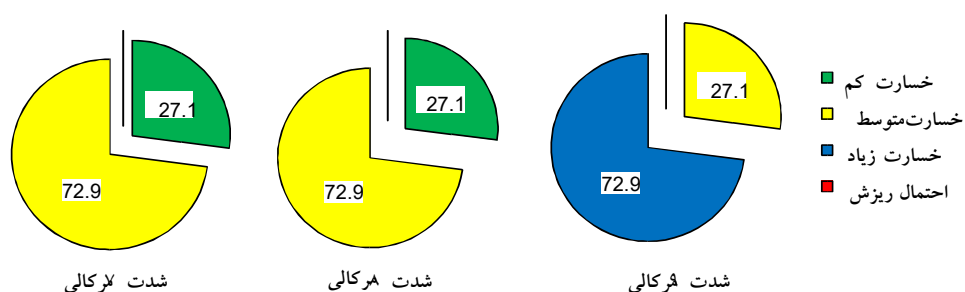
در شکل (۶)، نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه در سطح خطر زلزله ۹ مرکالی نشان داده شده است.



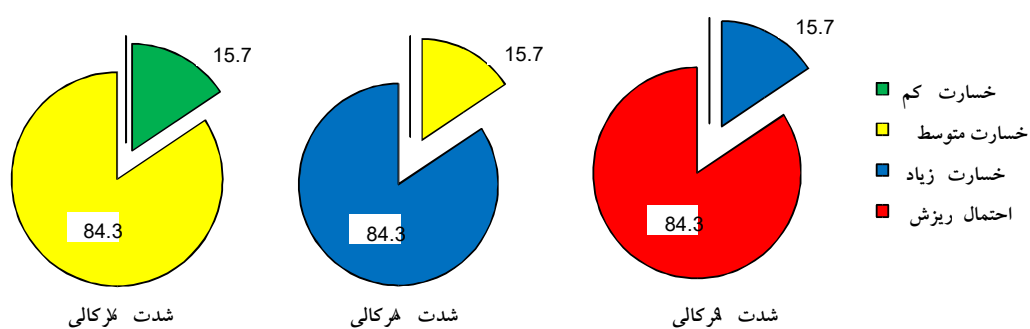
شکل ۶. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ساختمان‌های رشدیه تبریز در سطح خطر زلزله ۹ مرکالی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)



شکل ۷. درصد نوع خسارت ساختمان‌های بتنی در رشدیه تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)



شکل ۸. درصد نوع خسارت ساختمان‌های فولادی در رشدیه تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)



شکل ۹. درصد نوع خسارت ساختمان‌های مصالح بنایی در رشدیه تبریز (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۳)

همچنین در شکل‌های ۷-۹ درصد نوع خسارات وارده به ساختمان‌های بتنی (با دیوار برشی و بدون دیوار برشی)، ساختمان‌های فولادی (با مهاربند و بدون مهاربند) و ساختمان‌های مصالح بنایی (با کلاف افقی و قائم، با کلاف افقی و بدون کلاف) به تفکیک برای ساختمان‌های رشدیه تبریز نشان داده شده است که گویای بحرانی بودن وضع ساختمان‌های بنایی در زلزله‌های با شدت بالاست. همچنین وضعیت آسیب‌پذیری ساختمان‌های بتنی بهتر از ساختمان‌های فولادی است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های منطقه رشدیه به عوامل مختلفی از جمله نوع سازه، کیفیت طراحی، مصالح ساختمانی و رعایت اصول ساخت‌وساز وابسته است. تحلیل‌ها نشان داد که ساختمان‌های بتنی با دیوار برشی به دلیل طراحی مهندسی شده و رعایت استانداردهای ساخت‌وساز، عملکرد بسیار خوبی در برابر زلزله از خود نشان می‌دهند و کم‌ترین میزان آسیب‌پذیری را در شدت‌های مختلف زلزله دارند. این نوع ساختمان‌ها به‌عنوان الگویی مناسب برای ساخت‌وسازهای پایدار در مناطق زلزله‌خیز مطرح می‌شوند، زیرا علاوه بر تضمین ایمنی سازه، هزینه‌های نگهداری و بازسازی را نیز کاهش می‌دهند و بهره‌وری ساختمان را در طول عمر آن بهبود می‌بخشند.

در مقابل، ساختمان‌های بنایی بدون کلاف که بیشتر در این منطقه رایج هستند، بالاترین آسیب‌پذیری را در برابر زلزله‌ها نشان دادند. ضعف‌های موجود در طراحی، عدم وجود کلاف‌بندی افقی و قائم و استفاده از مصالح غیراستاندارد موجب آسیب‌پذیری بالای این ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های شدید شده است. این نوع سازه‌ها نه تنها تهدید جدی برای ایمنی ساکنان ایجاد می‌کنند بلکه از منظر پایداری نیز ناکارآمد هستند، زیرا نیاز به بازسازی مکرر دارند و مصرف منابع طبیعی و مالی بیشتری را در پی دارند. بر این اساس، مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها از طریق تقویت کلاف‌بندی، بهبود طراحی سازه‌ای و استفاده از مصالح مقاوم می‌تواند آسیب‌پذیری آن‌ها را کاهش دهد و به پایداری شهری کمک کند. ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند نیز علی‌رغم استفاده از مصالح مقاوم، به دلیل ضعف در طراحی سازه‌ای و عدم اجرای مناسب مهاربندی، آسیب‌پذیری زیادی در برابر زلزله دارند. این یافته نشان می‌دهد که صرف استفاده از مصالح با کیفیت بالا نمی‌تواند ایمنی و پایداری را تضمین کند و اهمیت رعایت اصول دقیق طراحی و اجرای استانداردهای مهندسی را برجسته می‌کند. اصلاح نواقص در طراحی این ساختمان‌ها و افزودن مهاربندهای مناسب می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد و آسیب‌پذیری آن‌ها را کاهش دهد. این پژوهش همچنین نشان داد که تمرکز ساختمان‌های آسیب‌پذیر در بافت‌های قدیمی و پرتراکم رشدیه، چالش‌های جدی برای مدیریت بحران و پایداری شهری ایجاد می‌کند. به‌ویژه در این مناطق که تراکم جمعیت بالا و ساخت‌وسازهای غیراصولی وجود دارد، علاوه بر افزایش خطرات لرزه‌ای، فشار زیادی بر زیرساخت‌های شهری و منابع امدادی وارد می‌آید؛ بنابراین، برنامه‌ریزی و طراحی مقاوم‌سازی برای این مناطق، همراه با ایجاد زیرساخت‌های امدادی مناسب در نزدیکی ساختمان‌های پرخطر، می‌تواند کمک شایانی به کاهش خسارات جانی و مالی زلزله کند و تاب‌آوری شهری را تقویت کند. این پژوهش همچنین تأکید می‌کند که ترکیب فناوری‌های نوین و اصول طراحی پایدار، مانند استفاده از نمای دوپوسته، مصالح هوشمند و سیستم‌های مقاوم‌سازی پیشرفته، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها داشته باشد. این رویکردها نه تنها ایمنی ساختمان‌ها را افزایش می‌دهند بلکه به کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی در طول عمر ساختمان کمک می‌کنند. در پژوهش‌های مختلف، تلاش‌های زیادی برای ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و پیش‌بینی خسارات ناشی از زلزله انجام شده است. Ghazanfarpour et al. (2019) در بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهر رفسنجان با تأکید بر پارامترهای کالبدی و جمعیتی به این نتیجه رسیدند که ۱۳/۵٪ از مناطق این شهر دارای آسیب‌پذیری بالا و ۳۶/۴٪ آسیب‌پذیری متوسط دارند، به‌رغم اینکه این شهر با خطر لرزه‌ای متوسط روبه‌رو است. این نتایج بر لزوم برنامه‌ریزی‌های دقیق برای کاهش آسیب‌ها تأکید می‌کند. در همین راستا، Mirhosseini et al. (2020) در بررسی آسیب‌پذیری محله فرحزاد تهران، با استفاده از تحلیل‌های فضایی در نرم‌افزار ArcMap، نشان دادند که این محله به دلیل بافت فرسوده و سکونتگاه‌های غیررسمی، در صورت وقوع زلزله،

با تخریب ۶۵ درصدی و تلفات انسانی بالا روبه‌رو خواهد شد. این یافته‌ها به ضرورت مقاوم‌سازی و برنامه‌ریزی‌های اضطراری برای کاهش آسیب‌ها اشاره دارند. در پژوهش‌های دیگر، Yaghfoori et al. (2021) با استفاده از روش آریا در ارزیابی آسیب‌پذیری مدارس ایرانشهر دریافتند که در صورت وقوع زلزله با شدت MSK9، ۹۰٪ مدارس دچار فروریزش خواهند شد. این مطالعه همچنین به ضرورت مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و توجه به قابلیت‌های مدارس به‌عنوان پایگاه‌های امدادرسانی در هنگام بحران تأکید دارد. مقایسه نتایج این مطالعات با پژوهش‌های مشابه مانند آنچه توسط Abo-El-Ezz et al. (۲۰۲۳) انجام شده، نشان‌دهنده اهمیت استفاده از روش‌های تحلیل سناریویی برای ارزیابی آسیب‌های ناشی از زلزله و همچنین لزوم مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها برای کاهش تأثیرات لرزه‌ای است. پژوهش‌های مشابه در سطح جهانی، از جمله مطالعات Silva et al. (2023) و Danciu et al. (2024)، نشان داده‌اند که نقشه‌های خطر لرزه‌ای و مدل‌های جامع ارزیابی خطر می‌توانند ابزارهای مؤثری برای پیش‌بینی و مدیریت بحران‌های ناشی از زلزله باشند. نتایج این مطالعات همگی بر اهمیت ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری و برنامه‌ریزی‌های مبتنی بر داده‌های علمی و مدل‌های پیشرفته تأکید دارند و نشان می‌دهند که در شرایطی مانند مناطق زلزله‌خیز ایران، استفاده از مدل‌های تحلیلی و مقاوم‌سازی مناسب برای کاهش آسیب‌های ناشی از زلزله ضروری است. این مقایسه‌ها می‌توانند مبنای خوبی برای تدوین استراتژی‌های جامع و هدفمند جهت کاهش خطرات ناشی از بلایای طبیعی در مناطق شهری و روستایی قرار گیرند. در نهایت، نتایج این تحقیق بر لزوم اجرای برنامه‌های مقاوم‌سازی برای ساختمان‌های آسیب‌پذیر و رعایت استانداردهای لرزه‌ای در ساخت‌وسازهای جدید تأکید دارد. طراحی سازه‌های مقاوم و پایدار نه تنها ایمنی ساکنان را تضمین می‌کند، بلکه به بهبود کیفیت محیط شهری و توسعه پایدار نیز کمک می‌کند؛ بنابراین، این مطالعه نشان می‌دهد که توجه به مقاوم‌سازی و رعایت اصول پایداری در مناطق زلزله‌خیز، گامی اساسی در کاهش خطرات لرزه‌ای و افزایش تاب‌آوری و ایمنی شهری است. با توجه به نتایج تحقیق پیشنهادات زیر را برای شهرک رشدیه تبریز برمی‌توان ارائه داد:

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج حاصل از پژوهش، شهرک رشدیه تبریز به دلیل قرارگیری بر روی گسل شمالی تبریز و وجود ساختمان‌های آسیب‌پذیر، نیازمند اقدامات جدی در حوزه مقاوم‌سازی، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران است. پیشنهادات زیر برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ایمنی این منطقه ارائه می‌شود:

- مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی بدون کلاف: ساختمان‌های بنایی بدون کلاف که بیش‌ترین سهم از ساختمان‌های آسیب‌پذیر را در رشدیه به خود اختصاص داده‌اند، باید در اولویت مقاوم‌سازی قرار گیرند. افزودن کلاف‌بندی افقی و قائم، تقویت دیوارها و استفاده از مصالح مقاوم، می‌تواند به بهبود عملکرد لرزه‌ای این ساختمان‌ها کمک کند. همچنین، ارائه تسهیلات مالی و فنی به ساکنان این ساختمان‌ها می‌تواند مقاوم‌سازی را تسهیل کند.
- اصلاح طراحی و تقویت ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند: ساختمان‌های فولادی بدون مهاربند به دلیل نقص در طراحی سازه‌ای، آسیب‌پذیری بالایی نشان داده‌اند. تقویت این ساختمان‌ها از طریق اضافه کردن مهاربندهای مناسب و رعایت اصول مهندسی در طراحی و اجرا ضروری است. آموزش سازندگان و پیمان‌کاران درباره اهمیت استفاده از مهاربندهای استاندارد می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش خطرات داشته باشد.
- رعایت استانداردهای ساخت‌وساز در پروژه‌های جدید: در ساخت‌وسازهای جدید در رشدیه، رعایت دقیق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نظیر استاندارد ۲۸۰۰ و استفاده از فناوری‌های مدرن الزامی است. طراحی سازه‌های مقاوم با استفاده از دیوارهای برشی، مصالح باکیفیت و فناوری‌های نوین می‌تواند تاب‌آوری ساختمان‌ها در برابر زلزله را افزایش دهد.
- برنامه‌ریزی برای بازسازی بافت‌های فرسوده: بخش‌هایی از رشدیه که دارای ساختمان‌های قدیمی و آسیب‌پذیر هستند، باید در قالب طرح‌های بازسازی شهری مورد توجه قرار گیرند. این بازسازی‌ها می‌تواند شامل نوسازی ساختمان‌های فرسوده، تغییر کاربری اراضی برای کاهش تراکم جمعیتی در مناطق پرخطر و ایجاد فضاهای باز برای امدادرسانی باشد.

- ایجاد زیرساخت‌های امدادی در مناطق پرخطر: با توجه به تراکم بالای جمعیت در رشديه و پراکندگی ساختمان‌های آسیب‌پذیر، ایجاد پایگاه‌های امدادی در نزدیکی مناطق پرخطر ضروری است. این پایگاه‌ها باید شامل تجهیزات لازم برای امدادسانی سریع و ایمن در زمان بحران باشند.
- آگاهی‌رسانی به ساکنان و پیمان‌کاران: آموزش و آگاهی‌بخشی به ساکنان رشديه درباره اهمیت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و نحوه مدیریت بحران در زمان زلزله می‌تواند به کاهش خسارات کمک کند. هم‌چنین، برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای پیمان‌کاران و مهندسان درباره اصول طراحی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی، می‌تواند کیفیت ساخت‌وساز در این منطقه را بهبود بخشد.
- پایش و نظارت مستمر بر ساخت‌وسازها: با توجه به رشد سریع ساخت‌وساز در شهرک رشديه، نظارت دقیق بر پروژه‌های ساختمانی برای رعایت اصول مقاوم‌سازی و استانداردهای مهندسی ضروری است. ایجاد سامانه‌های نظارتی و پایش مستمر وضعیت ساختمان‌ها می‌تواند در کاهش آسیب‌پذیری منطقه مؤثر باشد.
- ایجاد طرح‌های جامع شهری با محوریت پایداری: طراحی و اجرای طرح‌های جامع شهری که بر کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای و افزایش تاب‌آوری تمرکز دارند، از جمله اقدامات ضروری برای رشديه است. این طرح‌ها باید شامل توزیع متوازن تراکم جمعیتی، ایجاد فضاهای سبز و باز برای امدادسانی و بهبود زیرساخت‌های حمل‌ونقل و خدماتی باشند.
- استفاده از فناوری‌های نوین در طراحی نما و سازه: استفاده از فناوری‌هایی مانند نمای دوپوسته، سیستم‌های هوشمند کاهش مصرف انرژی و مصالح مقاوم، می‌تواند علاوه بر کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای، به پایداری محیطی و افزایش کیفیت زندگی در رشديه کمک کند.
- تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای: با توجه به تفاوت در نوع سازه‌ها و کیفیت ساخت‌وساز در مناطق مختلف رشديه، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر اساس شدت خطر و نوع ساختمان‌ها می‌تواند به مدیریت بهتر بحران و برنامه‌ریزی برای مقاوم‌سازی کمک کند.
- اجرای این پیشنهادات می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای شهرک رشديه، افزایش ایمنی و تاب‌آوری شهری و دستیابی به توسعه پایدار در این منطقه کمک کند. توجه به اصول مهندسی، پایداری و برنامه‌ریزی شهری در تمامی مراحل مقاوم‌سازی و ساخت‌وساز ضروری است. برای تحقیق در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در شهر تبریز به‌ویژه با استفاده از روش «آریا»، می‌توان به محدودیت‌ها و کمبودهایی اشاره کرد که مختص این شهر و ویژگی‌های آن هستند. در اینجا شش مورد از محدودیت‌های خاص که می‌تواند بر دقت و کیفیت نتایج تحقیق تأثیر بگذارد، آورده شده است:
 - کمبود داده‌های دقیق و بروز درباره وضعیت ساختاری ساختمان‌ها در تبریز
 - در بسیاری از مناطق تبریز، به‌ویژه در محله‌های قدیمی مانند شهرک رشديه، ساختمان‌ها طبق استانداردهای قدیمی طراحی و ساخته شده‌اند.
 - تنوع ویژگی‌های خاک و زمین‌شناسی در تبریز
 - تبریز در منطقه‌ای با ویژگی‌های زمین‌شناسی پیچیده واقع شده است که شامل خاک‌های مختلف و ساختارهای زیرسطحی متفاوت می‌شود.
 - عدم وجود سیستم یکپارچه اطلاعاتی برای مدیریت داده‌های زلزله در تبریز
 - تبریز به دلیل موقعیت جغرافیایی‌اش در معرض خطر زلزله قرار دارد، اما ممکن است در این شهر سیستم یکپارچه‌ای برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های زلزله و آسیب‌های ناشی از آن‌ها وجود نداشته باشد.
 - محدودیت‌های در دسترس بودن نرم‌افزارهای تخصصی و ابزارهای شبیه‌سازی
 - برای انجام تحلیل‌های دقیق با استفاده از روش آریا، نیاز به نرم‌افزارها و ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته است که ممکن است در تبریز به‌طور کامل در دسترس نباشند.

• عدم تطابق با شرایط خاص سازه‌ها و نوع ساخت‌وساز در تبریز
 بسیاری از ساختمان‌های تبریز به‌ویژه در مناطق قدیمی‌تر، بدون توجه به استانداردهای مقاوم‌سازی و به‌ویژه بر اساس طراحی‌های قدیمی ساخته شده‌اند.

• پاسخ ندادن به اثرات زلزله‌های بعدی (پس‌لرزه‌ها) و خرابی‌های غیرمستقیم
 در ارزیابی‌های معمول با روش آریا، معمولاً فقط اثرات مستقیم زلزله‌ها و خرابی‌های اولیه در نظر گرفته می‌شود؛ اما در تبریز، پس‌لرزه‌ها و اثرات غیرمستقیم زلزله‌ها مانند آتش‌سوزی‌های احتمالی یا نشت گاز ممکن است بر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها تأثیر داشته باشند.

سیاسگزاری: مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری می‌باشد. بدین‌وسیله از همکاری مشارکت‌کنندگان در این مقاله که سهم مؤثری در جمع‌آوری داده‌ها داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.
حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

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

References

- Abo-El-Ezz, A., Farzam, A., Fezai, H., & Nollet, M. J. (2023). Scenario-based earthquake damage assessment of highway bridge networks. *Advances in Bridge Engineering*, 4, 3. <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00083-4>
- Danciu, L., Giardini, D., Weatherill, G., Basili, R., Nandan, S., Rovida, A., & Wiemer, S. (2024). The 2020 European seismic hazard model: Overview and results. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 3049–3073. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3049-2024>
- Ghazanfarpour, H., Pourkhosravani, M., & Soleimani Sardo, M. (2019). Evaluation of seismic condition and physical and demographic vulnerability in Rafsanjan city. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(19), 123–150. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21352.1293> (In Persian)
- Iervolino, I., Baraschino, R., Belleri, A., Cardone, D., De Corte, G., Franchin, P., Lagomarsino, S., Magliulo, G., Marchi, A., Penna, A., Viggiani, L. R. S., & Zona, A. (2023). Seismic fragility of Italian code-conforming buildings by multi-stripe dynamic analysis of three-dimensional structural models. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(15), 4415–4448. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2167889>
- Khajavy, A., Samadzadeh, R., & Masoumi, M. (2024). Qualitative assessment of seismic vulnerability of buildings in Ardabil city with retrofitting approach. *Geographic Space*, 24(85), 141–157. (In Persian)
- Li, S.-Q. (2024). Assessment of the vulnerability of regional buildings considering low-temperature fields and seismic intensity measures. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03827. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03827>
- Maleki, S., Razavi, S. M., & Ramazanpour Asadi, K. (2022). Measurement and evaluation of resilience to earthquake in urban areas (Case study: Western district of Izeh city). *Research and Urban Planning*, 12(47), 187–202. <https://doi.org/10.30495/jupm.2022.4231> (In Persian)
- Mirhosseini, S. F., Haj Ebrahim Zargar, A., & Motavef, S. (2020). An assessment of the vulnerability of Tehran's Farahzad district in a possible earthquake. *Soffeh*, 30(3), 95–112. <https://doi.org/10.29252/soffeh.30.3.95> (In Persian)
- Mohaqqeqi, P., Ghadami, M., Azimi Amoli, J., & Janbaz Ghobadi, G. R. (2021). An investigation of earthquake resilience with an emphasis on urban form: A case study of District 12 of Tehran. *Urban Structure and Function Studies*, 8(29), 245–273. <https://doi.org/10.22080/usfs.2021.3445> (In Persian)
- Mohammadi Mivehrood, N., Hosseinzadeh Dalir, K., & Sattarzadeh, D. (2024). Analysis of physical factors affecting the resilience of marginal areas in metropolises (Case study: Ideloo neighborhood in Tabriz city). *Sustainable Development of Geographical Environment*, 6(10), 1–22. <https://doi.org/10.48308/sdge.2023.233015.1150> (In Persian)
- Shirzad, M., Namfar, H., & Ghanbari, A. (2023). Estimating the level of vulnerability of informal settlements in Tabriz city against earthquake risk. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(2), 285–304. <https://doi.org/10.22067/geoch.2022.78381.1273> (In Persian)

- Silva, V., Calderon, A., Caruso, M., Costa, C., Dabbeek, J., Hoyos, M. C., & Crowley, H. (2023). *Global seismic risk map*. Global Earthquake Model Foundation. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409623>
- Ward, P. J., Blauhut, V., Bloemendaal, N., Daniell, J. E., de Ruiter, M. C., Duncan, M. J., ... & Winsemius, H. C. (2020). Review article: Natural hazard risk assessments at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 1069–1096. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1069-2020>
- Xofi, M., Ferreira, T. M., Domingues, J. C., Santos, P. P., Pereira, S., Oliveira, S. C., & Lourenço, P. B. (2023). On the seismic vulnerability assessment of urban areas using census data: The Lisbon metropolitan area as a pilot study area. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(1), 242–265. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2197078>
- Yaghfoori, A., Miri, S. M., & Yaghfoori, H. (2021). Qualitative seismic vulnerability evaluation of schools in Iranshahr city. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 185–202. <https://doi.org/10.22111/jneh.2021.37214.1754> (In Persian)