

Seismic Risk Analysis in the Behbahan City Old Fabric

Sasan Motaghd ^{a*}, Nasrollah Eftekhari ^c, Amin Nakhlian ^b, Lotfollah Emadali ^a, Heshmatallah Mahmoudian ^b

^a. * Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

^b. Center of monitoring assessment and prediction of natural disasters (MAP), Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

^c. Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram 75761-59836, Iran.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2036864.1122>

ARTICLE INFO

Keywords:

Urbun Decay,
Seismic Hazard,
Building Vulnerability,
Fragility,
Debris Volume.

Received:

30 July 2024

Received in revised form:

16 October 2024

Accepted:

10 November 2024

pp. 1 - 15

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The occurrence of destructive earthquakes has been the cause of many human and financial losses in Iran. With the development of urbanization and construction activities in the vicinity of active faults, the risk of earthquakes has been increasing in recent centuries. Studying the risk of earthquakes and its consequences is an important research field that can be implemented using Geographic Information System (GIS) (Jena et al., 2020). According to the definition, risk is the product of three parameters: hazard, vulnerability, and exposure. The hazard may be potentially harmful to people, property, infrastructure, economic activity, and even the environment, all of which are categorized as elements or assets at risk. Population, buildings, essential facilities, and critical infrastructures can be mentioned among the important elements at risk that should be considered in the risk analysis. Vulnerability describes the characteristics and conditions of a community, system, or asset that expose it to the damaging effects of a hazard. Many GIS-based seismic risk models have been proposed. The Karmania Hazard Model (KHM) is one of these models. Hassanzadeh et al. (2013) presented the KHM to assess the seismic risk of Kerman City.

In this study, KHM was combined with probabilistic seismic hazard analysis in order to benefit from the advantages and capabilities of the PSHA in KHM. In this way, the capability of the proposed method to provide realistic analyses of earthquake risk will be improved. The proposed method has been tested in Behbahan Urbun decay. To this end, we calculated the earthquake risk in the urban decay and prepared the seismic risk maps of the area.

The study area

Historical data shows the occurrence of destructive earthquakes in the Behbahan region. These earthquakes have destroyed the old Behbahan region (Arjan) and left many losses. Following this earthquake, the village of Behbahan, which was located at a distance of about 8 kilometers from Arjan, gradually welcomed the people and turned into a settlement and prosperity, which finally showed itself as a Behbahan city in history in the 8th century. The occurrence of frequent earthquakes and the location of numerous small and large faults in the surrounding area of Behbahan show the seismic potential of this city

Funding

This research was done with the support of Bidbland Gas Refining Company.

Authors' Contribution

Data collection: Amin Nakhlian, Sasan Motaghed;
Data analysis: Heshmatullah Mahmoudian, Lotfullah Emad Ali, Amin Nakhlian, Nasraleh Eftekhari; Preparing and editing of the manuscript: Sasan Motaghed, Nasraleh Eftekhari; Preparation of maps: Heshmatullah Mahmoudian, Amin Nakhlian.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This research was conducted with the assistance of Bidbland Gas Refining Company. The processing utilized the resources of the Center of monitoring assessment and prediction of natural disasters (MAP) at Behbahan Khatam Alanbia University of Technology. We extend our sincere appreciation to them.

(Zolfegharifar and Bosak, 2016).

According to the 2015 census, Behbahan city has a population of about 122,604, of which 12,551 (about 10%) live in the worn texture of the city. Also, most of the commercial activities of the city are located in this sector. The total area of the residential part of the city is 22.3 km² and the area of worn texture is 1.7 km² (7.6% of the area of the urban area).

Methodology

In this research, the basis of risk calculation is based on the KHM. For this purpose, the acceleration of the ground on the bedrock will be determined by combining the KHM and the PSHA (Cornell-McGear approach). The site effects are considered by a well-known method on the acceleration of the bedrock and the acceleration on the ground surface is determined. Then, the acceleration is applied to the buildings and the damage limits are determined based on the fragility curves. Finally, according to the population living in each building, the Loss of human life is estimated. The proposed method includes three main steps, as follows:

- Earthquake risk analysis considering the local site effects (seismic hazard microzonation)
- Determining the vulnerability of buildings and facilities
- Investigating the exposure (people and assets)

Analysis, Results and discussion

The maximum acceleration (PGA) in the region was calculated using Open Quick software. The average estimated value of PGA for the 475-year return period of Behbahan city is equal to 0.32. Also, the average estimated value of PGA for the 2475-year return period of Behbahan city is equal to 0.49.

For most building types, the default HAZUS values assume that 10 out of 100 people in the collapsed part of the building will be killed immediately (over 80% damage) and another 5 out of 100 people will be trapped without rapid rescue and immediate treatment (general condition damage Greater than 60%) do not survive. These values are based on a variety of general building configurations and the assumption that even with a collapse, most at-risk occupants will be able to exit the structure. In cases where collapse failure is expected to crush or bury building occupants under heavy construction debris (such as concrete or masonry), users should modify the loss rate. In such cases, the loss rate for general damage above 60% should be increased by a factor of 2 (for localized collapse including heavy debris) to 5 (for complete pancake collapse of floors) (Hazus, 1999).

Based on HAZUS, in the damage above 80%, road closure, and the heavy debris, the minimum amount of casualties for high damage is multiplied with a factor of 2 (i.e., 30% of the residents) and for complete damage with a factor of 5 (i.e., 75% of the residents). In the design and severe earthquakes, it is estimated that more than 3765 and 9413 people are killed, respectively.

Conclusion

For a return period of 475 years, the acceleration on the bedrock is between 0.294g and 0.391g (compared to 0.3g for the 2800 standard). For the return period of 2475 years, this acceleration is in the range of 0.439g and 0.618g. The results of the risk analysis show that for the planned earthquake, about 45% of the buildings will be completely damaged and other existing buildings will also reach the category of severe damage. In a severe earthquake, all the buildings in this section will be completely destroyed. According to the residents of the area, the casualties in the design earthquake are 3,765 and in the severe earthquake are 9,413.

Corresponding author (Email: Motaghed@bkatu.ac.ir)



انحصار علمی بداند غیر عامل ایران

نشریه علمی شهر ایمن

شابا الکترونیکی: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

مقاله پژوهشی

تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر بهبهان

ساسان معتقد* - استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

نصراله افتخاری - استادیار، دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.

امین نخلیان - کارشناس ارشد مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

لطفاله عماد علی - استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

حشمت‌اله محمودیان - کارشناس ارشد مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2036864.1122>

چکیده

اطلاعات مقاله

تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهری یک فرآیند مهم است که برای شناسایی و ارزیابی تأثیرات زلزله بر سازه‌ها، زیرساخت‌ها، و جامعه در مناطقی که احتمال وقوع زلزله بالاست، انجام می‌شود. اطلاع از ریسک زلزله باعث می‌شود که شهرها و جوامع بتوانند با زلزله‌ها بهتر مقابله کرده، خسارات را کمتر و فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی را پس از وقوع زلزله به سرعت بازیابی کنند. شهر بهبهان از جمله شهرهایی است که به علت وجود چهار گسل فعال در پیرامون آن پتانسیل بالایی در زلزله‌خیزی دارد و همین مسئله باعث شده که تحلیل ریسک زلزله در آن بخصوص بافت فرسوده با حساسیت و توجه خاصی مدنظر قرار گیرد. هدف مقاله حاضر بررسی میزان خطرپذیری زلزله با توجه به مؤلفه‌های شرایط محلی خاک و اطلاعات ساختمان‌ها در بافت فرسوده شهر بهبهان می‌باشد. در این پژوهش از اصول روش‌های تحلیل ریسک زلزله مبتنی بر GIS با تمرکز بر مدل کارمانیا (KHM) و روش تحلیل احتمال خطر زلزله (PSHA) استفاده شده است. بر این اساس، کلیه پارامترهای مؤثر از جمله خصوصیات زمین‌شناسی، پرود غالب خاک و سرعت موج برشی، شیب ژئوتئید، نوع رسوب و ضخامت آبرفت به پرونده‌های شکل تبدیل، طبقه‌بندی و در نهایت در پایگاه داده‌ی یکپارچه شامل توزیع و وضعیت ساختمان‌ها ترکیب و نقشه ریسک زلزله تهیه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که در زلزله طرح حدود ۴۵ درصد ساختمان‌ها به خرابی کامل و سایر ساختمان‌های موجود نیز به رده خرابی بسیار زیاد (تا ۸۰ درصد) می‌رسند. در زلزله شدید همه ساختمان‌های موجود در این بخش به‌صورت کامل تخریب خواهند شد. با توجه به جمعیت ساکن در این بخش (۱۲۵۵۱ نفر) تلفات در زلزله طرح حدود ۳۷۶۵ و در زلزله شدید ۹۴۱۳ پیش‌بینی می‌شود. به این ترتیب برنامه‌ریزی قبل از زلزله برای بازسازی، مقاوم‌سازی و بهسازی این منطقه، امداد حین زلزله و مدیریت پس از زلزله ضروری به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی:

بافت فرسوده، تحلیل خطر زلزله، خسارت ساختمان، منحنی شکنندگی.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۰۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صص. ۱۵ - ۱

* نویسنده مسئول

ایانامه: Motaghed@bkatu.ac.ir

مقدمه

افزایش آسیب‌پذیری بافت‌های فرسوده در برابر زلزله شود. زلزله‌ها در ایران به دلیل واقع شدن کشور در منطقه‌ای با فعالیت لرزه‌ای بالا، همواره یک خطر جدی برای زندگی و اموال مردم بوده‌اند. بافت‌های فرسوده شهری به عنوان نقاط آسیب‌پذیرتر، در صورت وقوع زلزله با احتمال بیشتری مورد تأثیر قرار می‌گیرند. ضعف‌های ساختاری این بافت‌ها باعث می‌شود تا حتی زلزله‌هایی با شدت کمتر نیز به‌راحتی خسارت جدی ایجاد کنند. شهر بهبهان از جمله شهرهای استان خوزستان است که با توجه به قدمت و سابقه تاریخی آن بخش مرکزی آن دارای بافت فرسوده است.

سابقه لرزه‌خیزی شهر بهبهان و وقوع زلزله‌های متعدد و بعضاً مخرب، توجه ویژه به مسئله زلزله در شهر بهبهان را می‌طلبد. این شهر با قدمت بیش از ۱۰۰۰ سال به دلیل سن برخی ساختمان‌ها، نبود سیستم تعمیر و نگهداری مناسب و عدم رعایت استانداردهای ساختمانی، زلزله می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین و شاید مهم‌ترین خطر شهر پتانسیل آسیب بالایی داشته باشد.

ریسک به عنوان احتمال پیامدهای مضر یا خسارات مورد انتظار (مرگ، جراحات، اموال، معیشت، فعالیت‌های اقتصادی مختل شده یا آسیب به محیط‌زیست) ناشی از اثرات متقابل خطرات طبیعی یا انسانی و شرایط آسیب‌پذیر تعریف می‌شود (موسوی و بایرام زاده، ۱۴۰۳؛ *Lizundia et al., 2015*) با توجه به تعریف، ریسک حاصل ضرب سه پارامتر خطر، آسیب‌پذیری و در معرض بودن می‌باشد. خطر ممکن است به طور بالقوه برای افراد، دارایی‌ها، زیرساخت‌ها، فعالیت‌های اقتصادی و حتی محیط‌زیست مضر باشد که همگی تحت عنوان عناصر در معرض خطری یا دارایی‌ها دسته‌بندی می‌شوند. همچنین، اصطلاح در معرض بودن برای بیان آن دسته از عناصر در معرض خطر که مستعد خسارت احتمالی هستند استفاده می‌شود. از پارامترهای مهم و در معرض خطری که باید در تحلیل آسیب احتمالی خطرات در نظر گرفته شوند، می‌توان به جمعیت، ساختمان‌ها، تأسیسات ضروری و زیرساخت‌های حیاتی اشاره نمود. زیرساخت‌های حیاتی نیز شامل سازه‌ها، امکانات فنی و سیستم‌هایی است که از نظر اجتماعی، اقتصادی یا عملیاتی برای کارکرد اجتماعی در شرایط معمول یا در شرایط اضطراری ضروری هستند (*UN/ISDR, 2012*؛ حسین زاده و همکاران، ۱۴۰۳). عناصر در معرض خطر سطح معینی از آسیب‌پذیری دارند که می‌توان آن را به روش‌های مختلف تعریف نمود. طبق تعریف کلی، آسیب‌پذیری ویژگی‌ها و شرایط یک جامعه، سیستم یا دارایی را توصیف می‌کند که آن را در معرض اثرات مخرب یک خطر قرار می‌دهد (معتقد و دیگران، ۲۰۲۲). هنگامی که فقط آسیب‌پذیری فیزیکی در نظر باشد،

زلزله یک پدیده طبیعی است که ناشی از حرکات و رفتارهای صفحات زمین است. این حرکات معمولاً به دلیل تخلیه انرژی ناشی از جابه‌جایی گسله‌ها یا شکستگی‌های صفحات زمین اتفاق می‌افتد. زلزله‌ها می‌توانند باعث وقوع خسارت جدی به ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها و جمعیت شوند و به عنوان یکی از بزرگ‌ترین و خطرناک‌ترین پدیده‌های طبیعی شناخته می‌شوند. برای مدیریت و کاهش خطر زلزله، اقدامات پیشگیرانه مانند طراحی سازه‌ها با استانداردهای زلزله‌ای، ایجاد طرح‌های اضطراری و آموزش مردم در زمینه رفتارهای ایمن در زمان زلزله بسیار اهمیت دارد. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های هشدار زلزله و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS برای پیش‌بینی و مدیریت خطر زلزله می‌تواند موثر باشد. بافت فرسوده شهری به مناطقی از شهر گفته می‌شود که بر اثر عدم نگهداری و توسعه نامناسب، ساختارها و زیرساخت‌های آن‌ها قدیمی و ناپایدار شده‌اند. این مناطق معمولاً دارای ساختمان‌هایی با عمر طولانی هستند که از نظر ساختاری و فنی ضعیف شده‌اند و اغلب در فاصله زمانی زیادی بدون تعمیر و نگهداری مناسب مانده‌اند. به عبارت دیگر، بافت فرسوده شهری معمولاً به مناطقی اشاره دارد که بر اساس استانداردهای کنونی ساخته نشده‌اند یا استانداردهای ساختمانی زلزله‌ای ندارند.

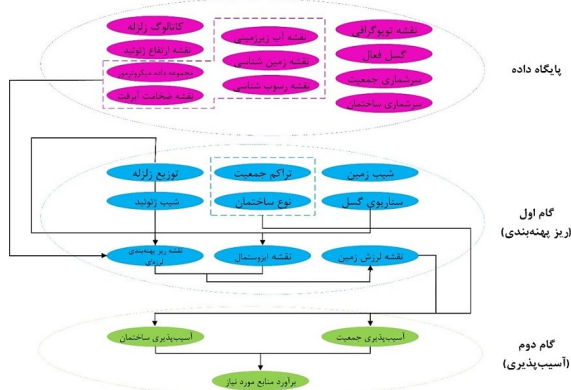
تأثیر زلزله بر این نوع بافت‌ها می‌تواند بسیار شدید باشد. این ساختمان‌ها بیشترین آسیب را در زمان زلزله تجربه می‌کنند زیرا ساختار ضعیفی دارند که می‌تواند به راحتی تحت تأثیر لرزه قرار بگیرد. خطرات مربوط به زلزله برای این بافت‌ها شامل فروریختن ساختمان‌ها، خسارت جدی به زندگی و اموال، ایجاد آسیب به زیرساخت‌های عمومی مانند جاده‌ها و پل‌ها، و احتمال ایجاد حوادث ثانویه مانند حریق و انفجار می‌شود.

به دلیل شدت خطرات زلزله بر بافت فرسوده، اهمیت اقدامات پیشگیرانه و بهبود ساختارها و زیرساخت‌های آن‌ها بسیار بیشتر است. استفاده از استانداردهای ساختمانی زلزله‌ای، تقویت و بازسازی ساختمان‌ها، و ایجاد طرح‌های اضطراری و آموزش مردم در زمینه رفتارهای ایمن در زمان زلزله از جمله اقداماتی است که می‌تواند خطرات زلزله بر بافت‌های فرسوده را کاهش دهد.

ایران یکی از کشورهایی است که بسیاری از شهرها و مناطق آن با بافت‌های فرسوده روبرو هستند. این بافت‌های فرسوده معمولاً شامل ساختمان‌هایی با سنین زمانی طولانی هستند که از نظر ساختاری و فنی ضعیف شده‌اند و اغلب بدون تعمیر و نگهداری مناسب مانده‌اند. عواملی مانند عدم اجرای استانداردهای ساختمانی زلزله‌ای، نبود نظارت مناسب در فرایند ساخت، و استفاده از مصالح نامناسب در ساختمان‌ها می‌تواند باعث

KHM تلاش شده است تا تعداد پارامترهای جدید مؤثر در منطقه لرزه‌خیزی ایران افزایش یابد، ضمن اینکه هر پارامتر برای رویکرد فرآیند سلسله مراتبی به وزن خاصی براساس قضاوت‌های کارشناسی نیاز دارد. براساس پایگاه داده *GIS*، تدوین سناریوی زلزله در سه مرحله صورت می‌پذیرد:

- ۱) آماده‌سازی پایگاه داده،
- ۲) ریز پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای،
- ۳) تحلیل آسیب‌پذیری (برآورد آسیب‌پذیری ساختمان و جمعیت) (شکل ۱).



شکل ۱. روند نمای مدل سناریوی زلزله *KHM* (Hassanzadeh et al., 2013)

داده‌های جمع‌آوری‌شده از منابع مختلف معمولاً به صورت داده‌های گسسته و در برخی موارد متناقض هستند. برای حل این مشکل، ممکن است داده‌ها نیاز به اصلاح داشته باشند. همچنین، با استفاده از روش‌های دورنمایی در نرم‌افزار *ArcGIS*، می‌توان یک سطح پیوسته و رستری از مجموعه‌ای از نقاط نمونه گسسته ایجاد نمود. در بخش تحلیل خطر در روش *KHM* که مبتنی بر دیدگاه تعینی می‌باشد، برای تبدیل داده‌های لرزه‌خیزی و تهیه نقشه هم‌لرز (دارای زلزله‌هایی که شدت آن‌ها مشابه است) از روابط کاهندگی مبتنی بر شدت استفاده می‌شود. داده‌های بانک اطلاعاتی با فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی (*AHP*) در دو سطح طبقه‌بندی (وزن‌دهی) می‌شوند. در سطح اول، به هر پارامتر بسته به سهم خود در ارزیابی ریسک زلزله، وزنی از ۰ تا ۱ اختصاص می‌یابد. در سطح دوم، به عناصر هر پارامتر وزنی از ۱ تا ۹ اختصاص داده می‌شود. سپس با همپوشانی حسابی مطابق رابطه ۱ مقادیر دامنه به دست می‌آید:

$$A_i = \sum G_i M_i T_i W_i S_i \quad (1)$$

در رابطه ۱:

A_i : مقدار دامنه در منطقه i

G_i : ترکیبی از نقشه‌های زمین‌شناسی و رسوب‌شناسی

M_i : اندازه‌گیری میکروترمور

T_i : ضخامت آبرفتی

می‌توان آن را به عنوان درجه آسیب به یک شیء (به عنوان مثال ساختمان) در معرض سطح معینی از شدت خطر (لرزش زمین) تعریف کرد (Motaghed et al., 2023). در ادبیات، مدل‌های بسیاری مانند مدل‌های خطر لرزه‌ای ملی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (*USGS*)، مدل خطر لرزه‌ای اروپا (*ESHM*)، مدل زلزله خاورمیانه (*EMME*)، مدل‌های خطر جهانی و مدل زلزله جهانی به همراه ابزارهای مربوطه به طور گسترده برای تحلیل خطر زلزله به کار گرفته شده‌اند (Woessner et al., 2015; Giardini et al., 2018). در این میان مدل‌های مبتنی بر *GIS* شامل تحلیل پتانسیل روانگرایی خاک (Mhaske and Choudhury, 2010) ریز پهنه‌بندی (Sun et al., 2008)، تحلیل بزرگنمایی لرزه‌ای (Mili et al., 2018)، ارزیابی خطرپذیری متحد (Pachakis and Kiremidjian, 2004)، مدل همپوشانی حسابی و وزنی برای ارزیابی خطر (معتقد و همکاران، ۱۴۰۲) و مدل خطر کارمانیا (*KHM*) نیز مورد توجه بوده است. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) مدل خطر کارمانیا را برای ارزیابی آسیب‌پذیری شهر کرمان ارائه دادند (Hassanzadeh et al., 2013). این مدل با محیط تعاملی ترکیبی از لایه‌های داده‌های مکانی و ضرایب آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و جمعیت را برآورد می‌کند. به این ترتیب میزان خسارت در ساختمان، علت آسیب و همچنین منابع مورد نیاز برای بازماندگان و مصدومان قابل تخمین است. مدل کارمانیا براساس شدت لرزه‌ای، میزان ساختمان‌های آسیب‌دیده، تعداد تلفات و گزارش نیازها پس از وقوع زلزله برای زمین‌لرزه سال ۱۳۸۲ شهر بم اعتبارسنجی شده است (Hassanzadeh et al., 2013). این مدل برای تعیین آسیب ساختمان‌ها و میزان تلفات و مصدومان در دو منطقه از شهر تبریز مورد استفاده قرار گرفته است (Karimzadeh et al., 2014). مدل کارمانیا مبتنی بر فرضیات تعینی است. به نظر می‌رسد اضافه شدن قابلیت‌های روش‌های احتمالی بتواند این روش را بهبود دهد.

در این مطالعه، مدل کارمانیا با تحلیل احتمالی خطر ترکیب شده است تا قابلیت‌های روش احتمالی در محاسبات ریسک روش کارمانیا وارد شود. به این ترتیب، قابلیت روش پیشنهادی در ارائه تحلیل‌های واقع‌بینانه از ریسک زلزله بهبود داده خواهد شد. روش پیشنهادی در شهر بهبهان به منظور محاسبه ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر مورد آزمون قرار گرفته و نقشه‌های مورد نیاز روش به طور کامل تهیه و ارائه شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، اساس محاسبه ریسک مبتنی بر روش *KHM* است. این روش از یک پایگاه داده برای محاسبه ریسک بهره می‌برد که در آن همه داده‌ها گروه‌بندی می‌شوند. در روش

تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر بهبهان

گسترده ساختمان‌ها نیاز دارد؛ اما معمولاً اطلاعات سال ساخت، مشخصات سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی و کیفیت آن در اختیار نیست؛ حال آنکه این نوع اطلاعات برای تحلیل‌های دقیق‌تر ضروری می‌باشند. فقط تعداد کمی از شهرهای جهان دارای چنین فهرست ساختمانی توسعه‌یافته‌ای هستند. نیروی زمین‌لرزه معمولاً بر حسب مشخصه‌ای از زلزله در سطح زمین یا در پی سازه تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، می‌توان خسارت را با مشخصات سازه‌ای ساختمان‌ها تخمین زد. مشابه EMS، طبقه‌بندی اصلاح شده توسط حسن زاده و همکاران برای ساختمان‌های ایران داده شده است. در این طبقه‌بندی، مطابق جدول ۱ برای انواع ساختمان‌ها ۶ حالت خسارت شامل حالت‌های آسیب تخریب کامل (D1)، تخریب بسیار زیاد (D2)، تخریب زیاد (D3)، تخریب متوسط (D4)، تخریب کم (D5) و بدون تخریب (D6) در نظر گرفته شده است.

W_i : سطح آب زیرزمینی

S_i : مقدار شیب ژئوئید

در نتیجه، نقشه سنج شدت از ترکیب از نقشه شدت لرزه‌ای و نقشه دامنه مطابق رابطه ۲ تولید می‌شود:

$$GSM = \sum A_i I_i \quad (2)$$

در این رابطه:

GSM : نقشه لرزش زمین،

A_i : مقدار دامنه و

I_i : مقدار شدت است.

در روش KHM برای در نظر گرفتن وضعیت ساختمان، نیاز به منحنی شکنندگی در مقیاس MMI است. طبقه‌بندی ساختمان‌ها با توجه به مشخصات سیستم سازه‌ای و تعداد طبقات، روشی متداول برای تمایز ساختمان‌ها و کمک به گزارش جزئیات است. برآورد دقیق خسارت و تلفات به فهرست

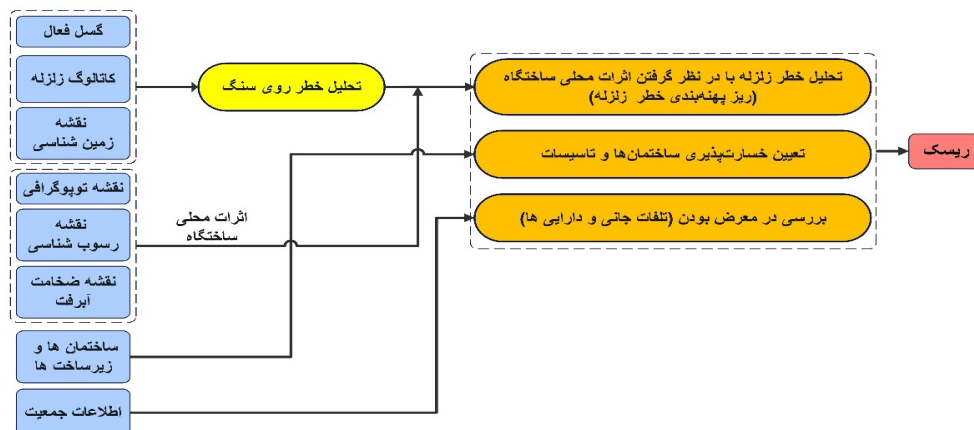
جدول ۱. شرح میزان خسارت ساختمان (Hassanzadeh et al., 2013) و میزان خسارت مربوطه توسط EMS 1998

توضیحات	درصد تخریب	سطح تخریب
خسارت‌ها ناچیز است.	۰-۲	بدون تخریب (D6)
ترک‌ها بسیار ریز وجود دارد.	۳-۱۰	تخریب کم (D5)
ترک‌های 4 mm تا 20 mm در ساختمان مشاهده می‌شود.	۱۱-۳۰	تخریب متوسط (D4)
ترک‌های بیش از 20 mm مشاهده می‌شود و برخی از اجزای ساختمان مانند دیوارها تخریب شده است	۳۱-۶۰	تخریب زیاد (D3)
بخشی از سقف بام و یک دیوار ساختمان تخریب شده است	۶۱-۸۰	تخریب بسیار زیاد (D2)
تمام سقف بام و بیش از یک دیوار ساختمان تخریب شده است	۸۱-۱۰۰	تخریب کامل (D1)

قابل تخمین است. فلوجارت روش پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. بر این اساس تحلیل ریسک شامل سه مرحله اصلی به شرح زیر است:

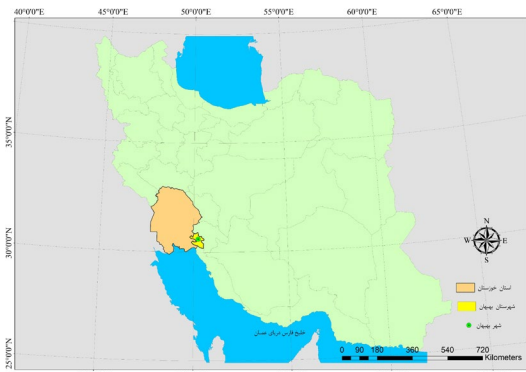
- ۱) تحلیل خطر زلزله با در نظر گرفتن اثرات محلی ساختمان (ریز پهنه‌بندی خطر زلزله)
 - ۲) تعیین خسارت‌پذیری ساختمان‌ها و تاسیسات
 - ۳) بررسی در معرض بودن (تلفات جانی و دارایی‌ها)
- در ادامه هر یک از این مراحل شرح داده شده است.

در این مقاله، با ترکیب روش تحلیل خطر کارمانیا و تحلیل احتمالی خطر زلزله (رویکرد کرنل-مک‌گیر) شتاب زمین روی سنگ‌بستر تعیین خواهد شد. اثرات محلی ساختمان با یک روش شناخته شده بر شتاب سنگ‌بستر تأثیر داده شده و شتاب در سطح زمین تعیین می‌شود. سپس، با تأثیر دادن شتاب بر ساختمان‌ها در پهنه جغرافیای شهری، بر اساس منحنی‌های شکنندگی حدود خسارت تعیین می‌شود. در مرحله آخر، با توجه به جمعیت ساکن در هر ساختمان میزان تلفات



شکل ۲. روند نمای روش پیشنهادی

کامل ویران شده است. این زلزله‌ها همچنین موجب شکسته شدن سد ارجان و مختل شدن امور زراعی و کشاورزی و تخریب دیوار دفاعی شهر شد. بر اساس منابع نوین بر اثر این دو زمین‌لرزه، تلفات زیادی به بار آمده، شهر ویران شده و زیرساخت‌های آن از بین رفته و از جمعیت و اهمیت تجاری ارجان تا حدود زیادی کاسته شده است (*Ambraseys and Melville, 2005; Mirzaei et al., 1997*). جدول ۲ زلزله‌های تاریخی (قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی) بهبهان و مناطق هم‌جوار (فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر) را نشان می‌دهد (*Mirzaei et al., 1997*). لازم به توجه است که در جدول ۱، بزرگای بسیاری از رخدادها گزارش نشده است. علت این امر وجود گزارش از زمین‌لرزه اما عدم امکان بزرگای آن بر اساس اسناد موجود بوده است. به دنبال حوادث مذکور، قریه بهبهان که در فاصله حدوداً ۸ کیلومتری از ارجان قرار داشته است، به تدریج پذیرای مردم گردید و رو به آبادی و رونق نهاد که سرانجام در قرن هشتم (هجری قمری) خود را در تاریخ نشان داد. رخداد زمین‌لرزه‌های مکرر و قرار داشتن گسل‌های کوچک و بزرگ متعدد در منطقه پیرامونی بهبهان، پتانسیل لرزه‌ای این شهر را نشان می‌دهد (*Zolfegharifar and Bosak, 2016*).



شکل ۳. موقعیت شهر بهبهان در شهرستان، استان و کشور

بر اساس اطلاعات آماری سال ۱۳۹۵ شهر بهبهان جمعیتی در حدود ۱۲۲۶۰۴ نفر دارد (نتایج سرشماری سال ۱۳۹۵ بایگانی‌شده در ۲۱ سپتامبر ۲۰۱۹ توسط *Wayback Machine* وبگاه مرکز آمار ایران) که ۱۲۵۵۱ نفر از آن (حدود ۱۰ درصد) در بافت فرسوده شهر سکونت دارند. همچنین عمده فعالیت‌های تجاری و بازار مرکزی شهر در این بخش قرار دارد. مساحت کل بخش مسکونی شهر ۲۲.۳ کیلومترمربع و مساحت بافت فرسوده ۱.۷ کیلومترمربع، معادل حدود ۱۷۰ هکتار، (۷.۶ درصد مساحت ناحیه شهری) است. شکل ۵ نقشه کاربری اراضی شهر را نشان می‌دهد.

برای انجام تحلیل خطر زلزله به روش احتمالی لازم است مدل منبع لرزه زا، مدل بازگشت زلزله، مثل پیش‌بینی حرکت زمین و مدل رخداد مدنظر قرار گیرد. نرم‌افزار اپن‌کویک (*Silva et al., 2015*; معتقد و افتخاری، ۱۴۰۲) برای انجام تحلیل احتمالی خطر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به این منظور لازم است روابط پیش‌بینی حرکت زمین به همراه وزن آن‌ها برای ترکیب در درخت منطقی به نرم‌افزار معرفی شود. خروجی تحلیل احتمالی مقادیر خطر به همراه انحراف معیار آن روی سنگ (خاک نوع ۱ با سرعت موج برشی بالای حدود ۷۵۰ متر بر ثانیه) است. سپس این مقادیر با لحاظ اثرات محلی ساختگاه از جمله نوع خاک (خاک نوع ۲ با سرعت موج برشی بین ۳۶۰ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه، خاک نوع ۳ با سرعت موج برشی بین ۱۸۰ تا ۳۶۰ متر بر ثانیه و خاک نوع ۴ با سرعت موج برشی کمتر از ۱۸۰ متر بر ثانیه) اصلاح می‌شود. لازم به تاکید است که در روش پایه مورد استفاده و روش پیشنهادی این مقاله، لایه ریزدانه‌گی قطعات و لایه معابر و شبکه شوارع و نفوذپذیری مورد توجه قرار نگرفته است.

منطقه مورد مطالعه

شهر بهبهان در استان خوزستان در جنوب غرب ایران واقع شده است (شکل ۳). بهبهان دشتی است در دامنه‌های زاگرس در جنوب شرق استان خوزستان که محل عبور راه‌های مواصلاتی بین استان‌های خوزستان، کهگیلویه و بویر احمد و فارس است. مساحت کل بهبهان ۳۱۹۵ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۲۲۵ متر قرار دارد.

داده‌های تاریخی نشان‌دهنده وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب در منطقه بهبهان است. این زلزله‌ها باعث تخریب منطقه بهبهان قدیم (ارجان) و تلفات بسیاری را به جا گذاشته است. به گفته ابن اثیر در سال ۴۴۴ هجری قمری، در خوزستان، مناطق ارجان و ایذه دچار زمین‌لرزه بسیار شدیدی شده است (ابن اثیر، ۶۲۸ ه.ق). در این زلزله، افراد زیادی به زیر آوار رفته و بناهای بسیاری تخریب و نابود شد. زلزله به قدری شدید بود که کوه شمالی ارجان (کوه خائیز) ترک خورده و سازندهایی از جنس گچ از آن بیرون زد. احتمالاً این زلزله از دلایل نابودی بسیاری از زیرساخت‌های آبیاری و کشاورزی شهر ارجان بوده است. پس از این زلزله، زمین‌لرزه دیگری در سال ۴۷۸ ه.ق. مجدداً ارجان و حومه آن را تحت تأثیر خود قرار داد. ابن اثیر در این باره گفته است: «بسیاری از دام‌ها و انسان‌ها به زیر آوار رفتند» و گمان این است که اولین صدمات جدی به پل‌های دوگانه ارجان متعلق به همین دوره است؛ و سال‌ها بعد این دو پل

تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر بهبهان

کمر بند چین خورده زاگرس با پتانسیل وقوع زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۲۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۵۰۰ و به ترتیب با بزرگای ۷، ۸، ۹ و ۱۰ در مقیاس مرکالی اصلاح شده گزارش کرده‌اند (Neghabat and Liu, 1977). در طبقه‌بندی نوروژی که ایران را به ۲۳ ایالت لرزه زمین‌ساخت تقسیم کرده است، شهر بهبهان در ایالت ششم یعنی دامنه چین خورده زاگرس واقع شده است. این ایالت در وقوع زلزله‌های کوچک و متوسط (تا ۵.۶ در مقیاس ریشتر) حداقل دوره بازگشت را دارند. بربریان و مهاجر اشجری پتانسیل وقوع زلزله در بهبهان با شدت ۷ مرکالی اصلاح شده را گزارش کرده‌اند. در سایر منطقه‌بندی‌ها نیز بهبهان در پهنه خطر زیاد (یک پله پایین‌تر از خیلی زیاد) قرار دارد (Berberian and Mohajer-Ashjai, 1977). چنانچه در شکل ۴ دیده می‌شود، براساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، بهبهان در منطقه خطر نسبی بالا واقع شده و شتاب پایه زلزله طرح در این منطقه برابر $0.3g$ در نظر گرفته می‌شود (استاندارد ۲۸۰۰، ۲۰۱۵).

تحلیل و نتایج

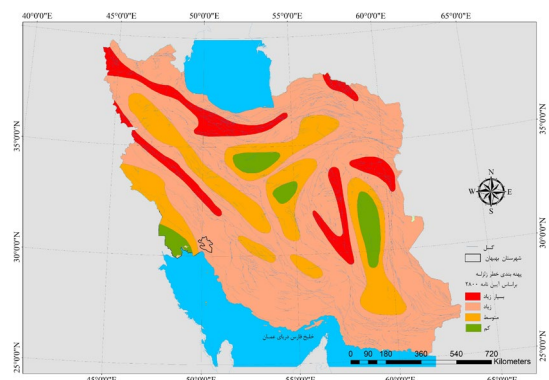
تحلیل خطر احتمالی زلزله

به کمک مدل ساخته شده در نرم‌افزار اپن کوییک شتاب بیشینه (PGA) محاسبه گردید. در این محاسبات حداقل بزرگای برابر با ۴.۵ منظور شده است. مقادیر a و b رابطه گوتنبرگ ریشتر به ترتیب ۴.۴۵ و ۱.۱۲ لحاظ شده است. روابط آکار و کاگانان ۲۰۱۰ (۰.۲)، آکار و همکاران ۲۰۱۳ (۰.۳۵)، چپو و یانگز ۲۰۰۸ (۰.۳۵) و ژائو (۲۰۰۶) (۰.۱) برای پیش‌بینی حرکت زمین استفاده شده است (Akkar and Cagnan, 2010; Akkar et al., 2013; Chiou and Youngs, 2008; Zhao, 2006). اعداد داخل پرانتز وزن روابط در درخت منطقی را نشان می‌دهد (Motaghd et al., 2023). میانگین برآورد شده مقدار PGA برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله شهر بهبهان برابر با 0.32305 با انحراف معیار (STD) برابر با 0.0135 است. همچنین میانگین برآورد شده مقدار PGA برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله شهر بهبهان برابر با 0.49028 با انحراف معیار (STD) برابر با 0.02556 است.

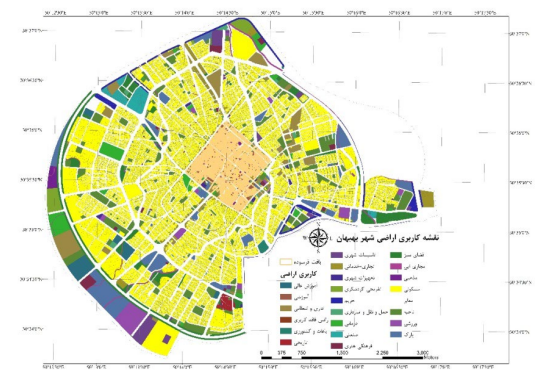
شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نقشه خطر زلزله شهر بهبهان و نقشه خطوط منحنی میزان خطر زلزله را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، میزان شتاب (g) برای دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال معادل با ۱۰٪ احتمال تجاوز در ۵۰ سال عمر مفید سازه (زلزله طرح استاندارد ۲۸۰۰ یعنی $APE=0.0021$ روی سنگ‌بستر (با سرعت موج برشی $v_s = 800 \frac{m}{s}$) است. مقدار PGA برای شهر بهبهان بین $0.294g$ و $0.391g$ قرار دارد.

جدول ۲. کاتالوگ زلزله‌های تاریخی (ماقبل ابزاری) بهبهان و مناطق هم‌جوار (Mirzaei et al., 1997)

بزرگا	سال	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
*	293-302	51.51	29.3
*	531-579	51.51	29.3
*	10th c.	51.51	29.3
5.8	1085/05	50.3	30.6
6.8	1052	50	31.5
*	1806	50.8	29
*	1824/6/25	51.6	29.7
*	1826/6/14	51.6	29.6
*	1853/6/11	50.3	29.6
*	1874/02	50.8	31.9
5.7	1875/3/21	50.5	30.5
5.3	1891/12/14	51.58	29.9



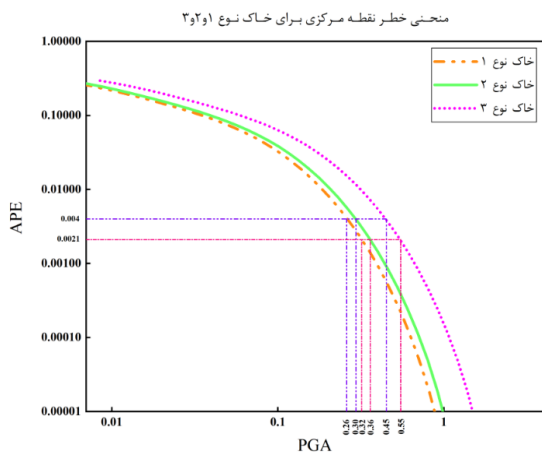
شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله در ایران و شهرستان بهبهان



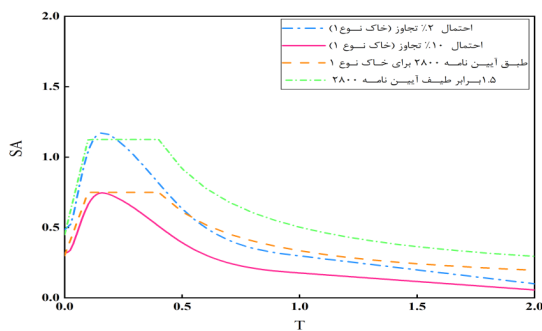
شکل ۵. نقشه کاربری اراضی شهر بهبهان

شهر بهبهان از نظر زمین‌ساختی ذیل گروه‌های زاگرس چین خورده رانده شده و دامنه زاگرس (فروافتادگی دزفول) قرار دارد. مرز بین این دو زیرگروه، گسل خمشی جبهه کوهستان است که منجر به تمایز زاگرس چین خورده رانده شده از کوهپایه‌های زاگرس شده و باعث وقوع زمین‌لرزه‌های عظیمی شده است. نقبات و لیو در پهنه‌بندی خطر ایران، بهبهان را در

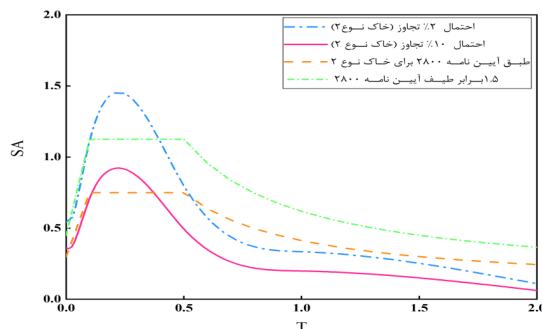
علاوه بر بیشینه شتاب افقی، منحنی خطر و طیف خطر برای خاک نوع ۱، ۲ و ۳ در دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال نیز محاسبه شده‌اند. شکل ۹ منحنی خطر برای خاک‌های نوع ۱، ۲ و ۳ مربوط به نقطه مرکزی بهبهان ($30^{\circ}35'39'' N$ و $50^{\circ}14'15'' E$) را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب طیف خطر برای نقطه مرکزی بهبهان (نقطه ۱) برای خاک نوع ۱، ۲ و ۳ با احتمال تجاوز ۲٪ و ۱۰٪ به همراه طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ خاک مربوطه را نشان می‌دهند. توجه شود که طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای زلزله طرح است. برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال (زلزله شدید) مقادیر طیفی ۱.۵ برابر طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ لحاظ شده است.



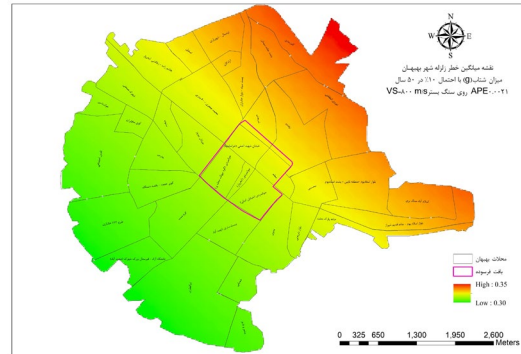
شکل ۹. منحنی خطر نقطه مرکزی بهبهان برای خاک نوع ۱ و ۲ و ۳



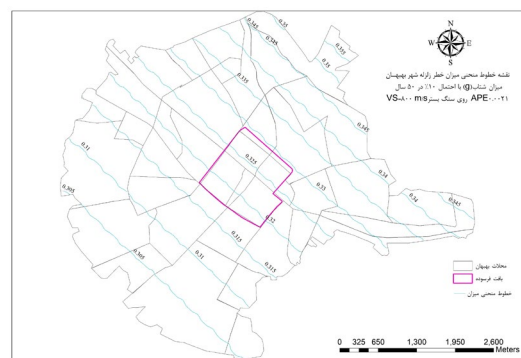
شکل ۱۰. طیف خطر نقطه مرکزی بهبهان (نقطه ۱) برای خاک نوع ۱



شکل ۱۱. طیف خطر نقطه مرکزی بهبهان (نقطه ۱) برای خاک نوع ۲

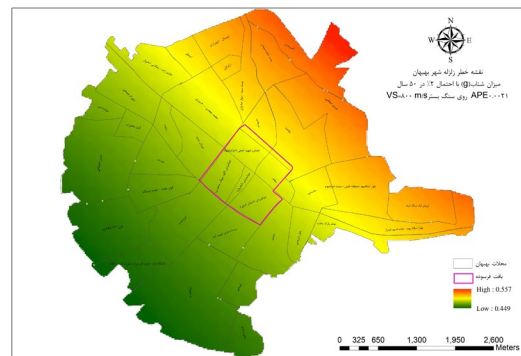


شکل ۶. نقشه‌ی خطر زلزله شهر بهبهان، میزان شتاب (g) با احتمال تجاوز ۱۰٪ در ۵۰ سال ($APE=0.0021$)، روی سنگ‌بستر ($V_s = 800 \frac{m}{s}$)



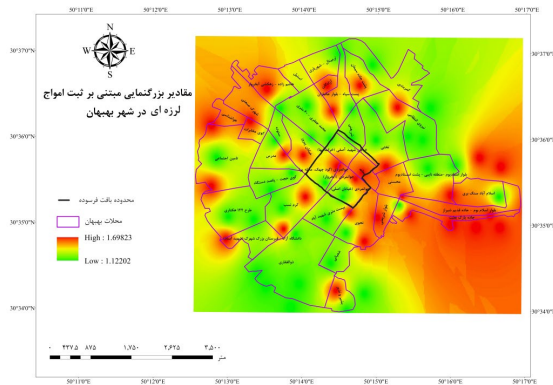
شکل ۷- نقشه خطوط منحنی میزان میانگین خطر زلزله، میزان شتاب (g) با احتمال تجاوز ۱۰٪ در ۵۰ سال، روی سنگ‌بستر

شکل ۸ نقشه خطر زلزله شهر بهبهان بر حسب شتاب g برای دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ سال را نشان داده که معادل با ۲٪ احتمال تجاوز در ۵۰ سال عمر مفید سازه (زلزله شدید استاندارد ۲۸۰۰ یعنی $APE=0.004$) روی سنگ‌بستر ($v_s = 800 \frac{m}{s}$) می‌باشد. مقدار PGA برای شهر بهبهان در محدوده $0.439g$ و $0.618g$ قرار دارد.



شکل ۸. نقشه‌ی خطر زلزله شهر بهبهان، میزان شتاب (g) با احتمال تجاوز ۲٪ در ۵۰ سال ($APE=0.004$)، روی سنگ‌بستر ($V_s = 800 \frac{m}{s}$)

تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر بهبهان



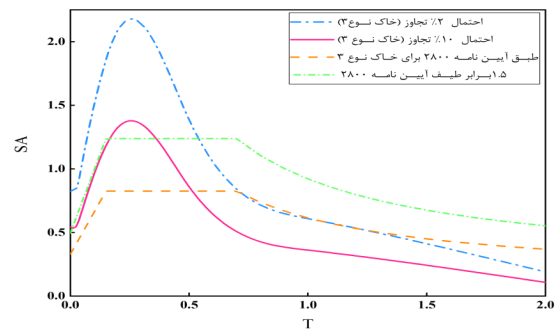
شکل ۱۳. بزرگنمایی مبتنی بر ثبت امواج لرزه ای

اطلاعات ساختمان‌ها

بافت فرسوده شهر بهبهان قدیمی‌ترین منطقه بهبهان است. خیابان‌ها و بازارهای اصلی شهر در این منطقه قرار دارند. مسیل آب خروار از کنار این بخش و خیابان اصلی شهر به صورت دو محور عمود بر هم از وسط این ناحیه عبور می‌کنند. از دیگر ویژگی‌های این بافت وجود بیش از ۹۸ مسجد، حسینیه و امامزاده در میان بافت مسکونی آن است. قدمت بیشتر خانه‌های این بخش به اواخر دوره قاجار و دوره پهلوی می‌رسد. از ویژگی‌های معماری این بناها می‌توان به وجود زیرزمین و در اکثر آن‌ها وجود ایوان با ستون‌های مدور، سردرهای قوسی به صورت نیم‌دایره و آجرکاری‌های تزیینی در نمای بیشتر آن‌ها اشاره کرد.

بر اساس پژوهش انجام شده توسط مفتخر و همکاران طرح خانه‌های قدیمی بهبهان، مانند سایر مناطق گرم و خشک درونگرا است و ساختمان در اطراف حیاط مرکزی شکل گرفته است. در بافت شهری ساختمان‌های با ساخت یک‌طرفه، دو طرفه، سه‌طرفه و چهار طرفه دیده می‌شود؛ که ساختمان چهار طرفه اکثریت دارند. بر اساس همین پژوهش در معماری سنتی بهبهان، از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا استفاده شده است. مصالح اصلی این ساختمان‌ها آجر و سنگ است. بناهای قدیمی‌تر اغلب از سنگ و گچ ساخته شده‌اند. سقف خانه‌ها نیز از چوب و خشت ساخته شده و با کاهگل پوشانده شده است (تمیزی، جهان نژاد، و بهشتی اصل؛ ۱۳۹۴). اکثر خانه‌های سنتی بهبهان، دارای زیرزمین (سرداب) بوده‌اند که برای سکونت استفاده می‌شده است. سقف زیرزمین‌ها حدود یک متر بالاتر از سطح حیاط بوده و روشنایی و تهویه آن از طریق پنجره تأمین شده است (محسنی و رحیم‌زاده، ۱۳۹۱).

علاوه بر ضعف بنا، بافت فرسوده بهبهان مشکلات اساسی دیگری نیز دارد. خانه‌های فرسوده محله پارکینگ ندارند و از طرفی هم امکان تردد خودرو در معابر کم‌عرض و کوچکی این محله وجود ندارد. مشکل دیگر دسترسی دشوار خودروهای امدادی به منازل مسکونی است چون در این کوچه‌ها حوادث بسیاری رخ داده که به دلیل دسترسی نامناسب برای خودروهای امدادی، امکان خدمات‌دهی فراهم نشده است.



شکل ۱۴. طیف خطر نقطه مرکزی بهبهان (نقطه ۱) برای خاک نوع ۳

انتقال امواج لرزه‌ای از سنگ‌بستر به سطح خاک با تغییر در مشخصات موج (بزرگنمایی) همراه است. یکی از روش‌های محاسبه بزرگنمایی، روش مبتنی بر امواج لرزه‌ای ثبت شده است (Zeng, et al. 2022). مقادیر بزرگنمایی مبتنی بر ثبت امواج مطابق جدول ۳ به دست آمده است. شکل ۱۳ مقادیر بزرگنمایی شتاب زمین را برای منحنی خطر با توجه به نوع خاک نشان می‌دهد. این مقادیر در ضریب زلزله روی سنگ‌بستر ضرب شده تا ضریب زلزله روی خاک محلی (زیر پی ساختمان) مشخص شود.

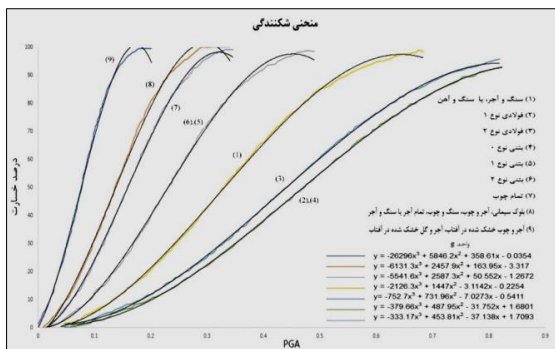
جدول ۳. بزرگنمایی مبتنی بر ثبت امواج لرزه‌ای

پرپود (تانیه)	بزرگنمایی خاک ۲	بزرگنمایی خاک ۳
۰	۱.۱۲۲۰۲	۱.۶۹۸۲۴
۰.۰۲۵	۱.۰۸۳۹۳	۱.۶۰۳۲۵
۰.۰۵	۱.۰۴۷۱۳	۱.۵۱۳۵۶
۰.۱	۱.۰۷۱۵۱۹	۱.۴۴۵۴۴۰
۰.۲	۱.۲۵۸۹۲۵	۱.۸۱۹۷۰۱
۰.۵	۱.۲۵۸۹۲۵	۲.۱۸۷۷۶۲
۱	۱.۱۲۲۰۱۸	۲.۰۴۱۷۳۸
۲	۱.۰۹۶۴۷۸	۱.۹۰۵۴۶۱

نقشه بزرگنمایی (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که در بخش شرقی و مرکزی بافت فرسوده شهر بهبهان مقادیر بزرگنمایی محلی می‌تواند اثرات مخرب زلزله را تا حدود ۷۰ درصد افزایش دهد. این افزایش برای ساختمان‌های این منطقه بسیار خطرناک است. لازم به توجه است که در اغلب ساختمان‌های قرار گرفته در این منطقه که قبل از تدوین آیین‌نامه‌های لرزه‌ای ساخته شده‌اند، اثرات بزرگنمایی و یا به طور کلی طرح لرزه‌ای لحاظ نشده است.

خشت و گل	۱۰	۲۹	۰.۰۱
سایر	۱۱	۵۴	۰.۰۲

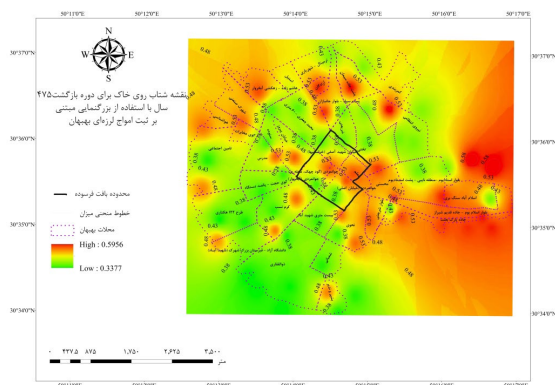
اطلاعات دیگری که برای برآورد ریسک ساختمان مورد نیاز است، احتمال رخداد درصد خسارت مشخص در سنجه شدت موردنظر زلزله است. نمونه‌ای از چنین منحنی‌هایی که برای سازه‌های ایران تهیه شده است در شکل ۱۴ نشان داده شده است (Tavakoli and Favakoli, 1993). به منظور استفاده از نمودارها، منحنی‌های برازش شده بر داده‌ها نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. منحنی‌های شکنندگی ۷ نوع ساختمان در منطقه مورد مطالعه به صورت تابعی از PGA (Tavakoli and Favakoli, 1993)

برهم‌نهی داده‌ها و تحلیل ریسک

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل خطر احتمالی روی سنگ‌بستر برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال در شهر بهبهان، ارائه می‌شوند. از روی هم گذاری لایه خطر برای دوره بازگشت موردنظر و لایه بزرگنمایی، نقشه شتاب روی خاک برای دوره‌های بازگشت موردنظر (۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال) حاصل می‌شود (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). شتاب روی خاک برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، بین ۰.۳۴ تا ۰.۶ و برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، بین ۰.۵ تا ۰.۹۲ متغیر است.



شکل ۱۵. نقشه شتاب روی خاک برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال با استفاده از بزرگنمایی مبتنی بر ثبت امواج لرزه‌ای بهبهان

بررسی و رتبه‌بندی انجام شده توسط امانپور و نصیری برم الوان (۱۴۰۰) مهم‌ترین دلایل فرسودگی بافت فرسوده بهبهان را به ترتیب نزولی کمبود و ناکارآمدی خدمات شهری، نبود تاسیسات زیربنایی مناسب، عدم امکانات گذران اوقات فراغت، عدم دسترسی‌های مناسب (وجود معابر ناکارآمد)، مشکلات زیست‌محیطی؛ کمبود سرانه مورد نیاز کاربری‌ها، معضلات عملکردی، ضعف همکاری نهادها و مدیریت نامناسب و نبود امنیت اجتماعی بیان کرده است.

بر اساس داده‌های آمارگیری سال ۱۳۹۵، اطلاعات بلوکی شامل اطلاعات جمعیت، نوع اسکلت (فلزی، بتنی و سایر) و نوع مصالح (آجر و آهن، آجر و چوب، بلوک سیمانی، تمام آجر یا سنگ و آجر، تمام چوب، خشت و چوب، خشت و گل و سایر) تهیه و در سیستم GIS پس از اصلاحات و یکپارچه نمودن سیستم‌های مختصات، لایه‌های مختلف مدنظر از آن تهیه شد. همچنین لایه طرح جامع شهری بهبهان پس از تبدیل به فرمت GIS، به عنوان داده ورودی به سیستم وارد شد. با توجه به داشتن دو لایه بلوک‌های ساختمانی و طرح جامع، از آنجا که اطلاعات مربوط به نوع اسکلت و مصالح بکار رفته در ساختمان‌ها و تعداد هر کدام در لایه بلوک‌ها وجود داشته و عملاً امکان تلفیق نهایی نبود، از لایه طرح جامع که ساختمان‌های هر بلوک در آن مشخص است برای تفکیک خانه به خانه لایه بلوک استفاده گردید. در مرحله بعد با توجه به لایه بدست آمده، لایه اسکلتی را به ۳ دسته فولادی با کد ۱، بتنی با کد ۲ و سایر با کد ۳ و همچنین لایه مصالح را به ۸ دسته آجر و آهن با کد ۴، آجر و چوب با کد ۵، بلوک سیمانی با کد ۶، تمام آجر یا سنگ و آجر با کد ۷، تمام چوب با کد ۸، خشت و چوب با کد ۹، خشت و گل با کد ۱۰ و سایر با کد ۱۱ تقسیم کرده و نقشه‌ی اسکلت و مصالح ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان (در مجموع ۲۳۰۷ واحد ساختمانی) تهیه گردید. جدول ۴ نوع و تعداد ساختمان‌ها در بافت قدیم را نشان می‌دهد.

جدول ۴. نوع و تعداد ساختمان‌ها در بافت قدیم شهر بهبهان

نسبت	تعداد	کد	نوع اسکلت	نوع مصالح به کار رفته
۰.۱۳	۳۰۴	۱	فولاد	
۰.۱	۲۱۹	۲	بتن	
۰.۷۷	۱۷۸۴	۳	سایر	
۰.۷۱	۱۶۴۶	۴	آجر و آهن	
۰.۰۴	۸۵	۵	آجر و چوب	
۰.۰۲	۵۰	۶	بلوک سیمانی	
۰.۱۹	۴۳۳	۷	تمام آجر یا سنگ و آجر	
~	۱	۸	تمام چوب	
~	۹	۹	خشت و چوب	

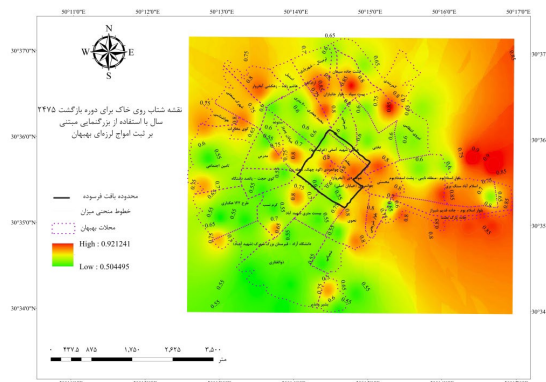
تحلیل ریسک زلزله در بافت فرسوده شهر بهبهان

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نقشه درصد تخریب ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال را نشان می‌دهند. شکل ۱۷ نشان‌دهنده خرابی کامل ($D1$) برای حدود ۴۵ درصد از فضاهای موجود در بافت قدیم در یک دوره بازگشت ۴۷۵ ساله می‌باشد. سایر ساختمان‌های موجود در این بخش نیز در رده خرابی بسیار زیاد ($D2$) قرار گرفته‌اند. همچنین، بر اساس شکل ۱۸، برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال همه ساختمان‌های موجود در این بخش به‌صورت کامل تخریب خواهند شد. با توجه به اهمیت تجاری منطقه و اینکه جمعیت نسبتاً زیادی در این منطقه سکونت دارند، خسارات مالی و تلفات ناشی از این تخریب‌ها در هر دو حالت بسیار بالا خواهد بود. همچنین، به دلیل نامناسب بودن معابر این محدوده، تردد خودروهای امدادی در این محدوده عملاً غیرممکن بوده و این موضوع نیز در افزایش خسارات جانی نقش بسزایی خواهد داشت.

برای اکثر انواع ساختمان‌ها، بر اساس مقادیر پیش‌فرض هازس فرض بر این است که ۱۰ نفر از هر ۱۰۰ نفر در بخش فروریخته ساختمان بلافاصله کشته می‌شوند (خسارت بالای ۸۰ درصد) و ۵ نفر دیگر از هر ۱۰۰ نفر به دام می‌افتند و بدون نجات سریع و درمان فوری (شرایط عمومی خسارت ۶۰ درصد به بالا) زنده نمی‌مانند. این مقادیر بر اساس انواع پیکربندی‌های عمومی ساختمان و این فرض است که حتی با فروریختن اکثر ساکنان در معرض خطر می‌توانند از سازه خارج شوند. در مواردی که انتظار می‌رود شکست فروریختن ساکنان ساختمان را در زیر آوارهای سنگین ساختمانی (مانند بتن یا مصالح بنایی) له یا مدفون کند، تحلیلگر باید میزان تلفات را متناسب با شرایط تغییر دهد. در چنین مواردی، میزان تلفات برای خسارت عمومی بالای ۶۰ درصد باید با ضریب ۲ (برای ریزش محلی شامل زباله‌های سنگین) تا ۵ (برای ریزش کامل پنکیک طبقات) افزایش یابد (Hazus, 1999).

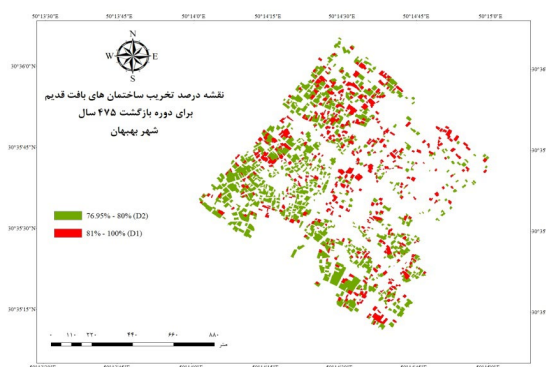
بر این اساس، با توجه به خسارت بالای ۸۰ درصد، بسته شدن مسیر و سنگین بودن آوار حداقل میزان تلفات برای خرابی زیاد با ضریب ۲ (یعنی ۳۰ درصد ساکنین) و برای خرابی کامل با ضریب ۵ (یعنی ۷۵ درصد ساکنین) در زلزله طرح بیش از ۳۷۶۵ و در زلزله شدید ۹۴۱۳ نفر تخمین زده می‌شود.

چنین حجمی از تلفات در کنار مجروحین جسمی و روحی، اثرات دومینویی به همراه دارد. به همین جهت آسیب‌پذیری اجتماعی-اقتصادی سیستم شهری از نظر اختلالات اجتماعی و اقتصادی نیز باید ارزیابی شود. نمونه چنین عواقبی تولید و یا فروش از دست رفته توسط بنگاه‌ها به دلیل آسیب‌دیدگی خطوط حیاتی، زبان‌های ناشی از درآمدهای مالیاتی و افزایش سهم بیمه‌های بیکاری و از کار افتادگی است که در شهری با

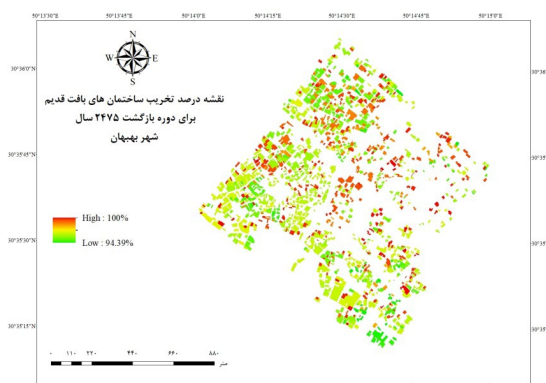


شکل ۱۶. نقشه شتاب روی خاک برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال با استفاده از بزرگنمایی مبتنی بر ثبت امواج لرزه‌ای بهبهان

در این مرحله، مقدار خطر برای هر سازه بدست آمده است. با ترکیب این اطلاعات با اطلاعات منحنی شکنندگی، درصد تخریب ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ترتیب در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ آورده شده است. نقشه درصد تخریب برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال برای انواع ساختمان‌ها در دو حالت خسارت شامل تخریب کامل ($D1$) و تخریب بسیار زیاد ($D2$) و همچنین نقشه درصد تخریب برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال برای انواع ساختمان‌ها در حالت خسارت تخریب کامل ($D1$) تهیه شده است.



شکل ۱۷. نقشه درصد تخریب ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان در زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال (زلزله طرح)



شکل ۱۸. نقشه درصد تخریب ساختمان‌های بافت قدیم شهر بهبهان در زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال (زلزله شدید)

ساختار سنتی غیرقابل جبران به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

مدل‌های تحلیل‌های لرزه‌ای نقش بسیار مؤثری را در توسعه شهری ایفا می‌نمایند. امروزه، بسیاری از مدل‌های معتبر توسعه یافته‌اند که می‌توانند برای خطر لرزه‌ای، ارزیابی خطرپذیری و برآورد خسارت مورد استفاده قرار گیرند. بخش مهمی از این مدل‌ها از بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره می‌برند. اساس این مدل‌ها بر اطلاعات موجود از پارامترهای مکانی موثر بر ریسک زلزله قرار دارد. به دلیل کمبود این اطلاعات، ترکیب این روش‌های غیر ارگودیک با روش‌های ارگودیک مبتنی بر اصول فیزیک و آمار می‌تواند مزایای هر دو روش را به همراه داشته باشد. به این ترتیب هر چند جمع‌آوری و یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف از منابع مختلف به منظور ایجاد یک سناریوی مؤثر برای ارزیابی خطر و ریسک زلزله به راحتی امکان‌پذیر نیست، اما در دسترس بودن انواعی هر چند محدود از داده‌ها می‌تواند بخشی از الزامات را برآورده کرده و در کنار مدل‌های ریاضی مبتنی بر فیزیک و آمار، تصویر بهتری از ریسک زلزله در منطقه فراهم کند.

برای رسیدن به مزایای فوق، در این مقاله با ترکیب روش تحلیل ریسک کارمانیا و تحلیل خطر احتمالی زلزله روشی برای تحلیل ریسک پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی برای تحلیل ریسک بافت فرسوده شهر بهبهان استفاده شده است. به این منظور ابتدا خطر زلزله با ارائه منحنی خطر و طیف خطر یکنواخت در محل هر ساختمان برای زلزله طرح و زلزله شدید استاندارد ۲۸۰۰ ارائه شده است. سپس، منحنی شکنندگی مناسب از ادبیات انتخاب شده و میانگین خسارت در چهار میزان خسارت جزئی، متوسط، گسترده و کامل داده شده است. بر اساس این نتایج تخمینی از میزان تلفات در هر حالت آسیب مشخص شده است. برای دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال شتاب روی سنگ‌بستر بین $0.294g$ و $0.391g$ (در مقایسه با $0.3g$ استاندارد ۲۸۰۰) قرار دارد. برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال این شتاب در محدوده $0.439g$ و $0.618g$ قرار دارد. نتایج تحلیل ریسک نشان می‌دهد که در زلزله طرح حدود ۴۵ درصد ساختمان‌ها به خرابی کامل و سایر ساختمان‌های موجود نیز به رده خرابی بسیار زیاد می‌رسند. در زلزله شدید همه ساختمان‌های موجود در این بخش به‌صورت کامل تخریب خواهند شد. با توجه ساکنین

منطقه تلفات در زلزله طرح ۳۷۶۵ نفر و در زلزله شدید ۹۴۱۳ نفر قابل تخمین است. بدیهی است که این حجم از تلفات عواقب اجتماعی-اقتصادی غیرقابل جبرانی برای شهر به همراه دارد و می‌تواند به نابودی بخش عظیمی از میراث اجدادی و ازهم‌گسیختگی ساختار اجتماعی شهر بهبهان شود.

بر اساس این نتایج، برنامه‌ریزی جمعی برای جلوگیری از خسارت مالی و جانی گسترده که ممکن است منجر به فاجعه‌ای انسانی شود، لازم است. این برنامه باید در سه سطح قبل از زلزله، حین زلزله و پس از زلزله را مورد توجه داشته باشد. قبل از زلزله آگاهی‌رسانی به شهروندان، تعریض معابر مهم با توجه احتمال بالای انسداد آن‌ها در اثر آوار، لحاظ مناطق امن و ساخت و تجهیز مراکز امدادسانی در درون محدوده، مقاوم‌سازی بافت تاریخی قرار گرفته در دل مجموعه و توجه کافی به بازسازی منطقه و تخریب بناهای پرخطر اهمیت حیاتی دارد. با توجه به عبور خطوط حیاتی متعدد شامل آب، برق و گاز ایمن‌سازی به منظور قطع جریان در زمان زلزله بسیار پراهمیت است. با داشتن چنین تمهیداتی می‌توان زلزله را به حداقل خسارت رساند و به مدیریت پس از زلزله امیدوار بود.

در نهایت یادآوری می‌شود که در این مقاله تحلیل تا حد آوار و تلفات انجام شده است. برای بررسی دقیق‌تر مسئله بافت فرسوده لازم است حتماً لایه‌های ریزدانه‌ی قطعات، لایه معابر و شبکه شوارع و نفوذپذیری مورد توجه قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت شرکت پالایش گاز بیدبلند بهبهان انجام شده است. پردازش‌ها با استفاده از امکانات مرکز پایش، ارزیابی و پیش‌بینی بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی (MAP) دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان صورت گرفته است. بدین‌وسیله نهایت سپاس خود را از ایشان اعلام می‌داریم. ضمناً نقشه‌های تهیه شده در سایت مرکز به آدرس khrisk.ir قابل دسترسی است.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: امین نخلیان، ساسان معتقد؛ تحلیل داده‌ها: حشمت‌الله محمودیان، لطف‌الله عمادعلی، امین نخلیان، نصراله افتخاری؛ تدوین مقاله: ساسان معتقد، نصراله افتخاری؛ تهیه نقشه‌ها: حشمت‌الله محمودیان، امین نخلیان.

References

- [1] Akkar, S., & Cagnan, Z. (2010). [A Local Ground-Motion Predictive Model for Turkey, and Its Comparison with Other Regional and Global Ground-Motion Models](#). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 2978–2995.
- [2] Akkar, S., Sandikkaya, M. A., and Bommer, J. J. (2013). [Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East](#). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 359–387.
- [3] Amanpour, S. and Nasiri Barm Elvan, E. (2024). [Investigating and Evaluating the Livability Status of Worn-Out Neighborhoods in Behbahan City with a Future Research Approach](#). *Urban Economics and Planning*, 5(1), 138-153. [In Persian]
- [4] Ambraseys, N. N., Melville, C. P. (2005). *A History of Persian Earthquakes*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [5] Arkani E, Hatami Nejad H, Qare S. (2021). [Identifying and prioritizing the factors affecting the increase of earthquake risk in worn-out urban areas with a combined approach of fuzzy Delphi technique and BMW model](#). *Jgs*, 20 (59) :291-306. [In Persian]
- [6] Asadi aziz abadi M, ziari K A, vatan khahi M. (2020). [Prioritizing the dimension of resilient deteriorated urban fabric based on a disaster resilience of place model \(case study: the deteriorated urban fabric of Karaj\)](#). *jgs*, 20 (56) :311-328. [In Persian]
- [7] Berberian, M. and Mohajer-Ashjai, A. (1977) Seismic Risk Map of Iran, A Proposal, Contribution to the Seismotectonics of Iran, Part III. *Geological Survey of Iran*, 40, 121-150.
- [8] Building & Housing Research Center, BHRC (2015), *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Standard No. 2800*, Publication PNS-253, 4rd Revision, 240, Tehran, Iran. [In Persian]
- [9] Chiou, B. J., & Youngs, R. R. (2008). [An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra](#). *Earthquake Spectra*, 24(1), 173–215.
- [10] Giardini, D., Danciu, L., Erdik, M., Şeşetyan, K., Demircioğlu Tümsa, M., Akkar, S., . . . Zare, M.(2018). [Seismic hazard map of the Middle East](#). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16.
- [11] Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998 (EMS-98).
- [12] Hassanzadeh, R., Nedović- Budić, Z., Alavi Razavi, A., Norouzzadeh, M., & Hodhodkian, H. (2013). [Interactive approach for GIS-based earthquake scenario development and resource estimation \(Karmania hazard model\)](#). *Computers & Geosciences*, 51, 324-338.
- [13] Hazus, M. H. (1999). *Earthquake loss estimation methodology—technical and user manuals*. Federal Emergency Management Agency, Washington.
- [14] hossienzadeh, P. , nasiri hendekhaleh, E. and mohammadpour, Y. (2024). [Measuring the resilience of access networks in urban areas against earthquakes \(Case study: District 3 of Tehran city\)](#). *Safe City*, 7(3), 55-68. [In Persian]
- [15] Ibn al-Athir al-Jazari, 'Izz al-Din Abu al-Hasan 'Ali. (1250 CE / 628 AH). *Al-Kamil fi al-Tarikh*. Beirut: Dar al-Kutub al-'Ilmiyya.
- [16] Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Al-Amri, A., & Sofyan, H. (2020). [Seismic hazard and risk assessment: a review of state-of-the-art traditional and GIS models](#). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(2), 1-21.
- [17] Karimzadeh, S., Miyajima, M., Hassanzadeh, R., Amiraslazadeh, R., & Kamel, B. (2014). [A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz](#). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 263-280.
- [18] Kiani, A., & Nasiri, E. (2019). [Investigation of renovation and reconstruction of worn-out textures in Behbahan city with emphasis on optimal adaptation of urban land use](#). *Shabak*, 5(1, Serial No. 40), 65–77. [In Persian]
- [19] Lizundia, B., Durphy, S., Griffin, M., Holmes, W., Hortacsu, A., Kehoe, B., ...& Welliver, B. (2015). [Update of FEMA P-154: Rapid visual screening for potential seismic hazards](#). *In Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, 775-786.
- [20] Mashhoor, Z. (2022). [Investigation of Brick Arrays of Historical Houses in the City of Behbahan in the Pahlavi Period](#). *Journal of Iranian Architecture Studies*, 10(20), 27-48. [In Persian]
- [21] Mhaske, S. Y., & Choudhury, D. (2010). [GIS-based soil liquefaction susceptibility map of Mumbai City for earthquake events](#). *Journal of Applied Geophysics*, 70(3), 216-225.
- [22] Mili, R. R., Hosseini, K. A., & Izadkhah, Y. O. (2018). [Developing a holistic model for earthquake risk assessment and disaster management interventions in urban fabrics](#). *International journal of disaster risk reduction*, 27, 355-365.
- [23] Mirzaei, N.; Gao, M. T.; Chen, Y. T.; Wang, J.,(1997), [A uniform catalog of earthquakes for seismic hazard assessment in Iran](#). *Acta Seismologica Sinica*, 10(6), p.p. 713-726.
- [24] Mofakhar Z, Momeni K, Didehban M. (2021). [Expressing the application of proportions in Performance the yard of traditional homes In Behbahan\(Qajar and First Pahlavi periods\)](#). *JRIA*. 9(2), 61-84. [In Persian]

- [25] Mohseni, H., & Rahimzadeh, M. (2012). The role of environment in spatial organization of houses in hot and dry climate: A case study of Behbahan city. In *Proceedings of the National Conference on Iranian-Islamic Architecture and Urbanism* (Mashhad, Iran). [In Persian]
- [26] Moradi Tayebi F, motaghed S, Dastanian R. (2020). [Evaluation Chaotic Behavior and Time Series Prediction of Tehran Earthquakes](#). *MCEJ*, 20 (3) :147-160. [In Persian]
- [27] Motaghed, S., Mehrabi Moghaddam, A., & Moayyeri, N. (2023). [Reliability of Iranian Existing Residential Reinforced Concrete Structures in Seismic Events](#). *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application*, 6(2), 55-64.
- [28] Motaghed, S., nakhlian, A., emadali, L., eftekhari, N., & mahmoudian, H. (2023). [Seismic hazard assessment using arithmetic-weighted overlay method based on earthquake potential index \(EPI\), the southwestern Iran](#). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*. 17(1), 23-40. [in Persian]
- [29] Motaghed, S., nakhlian, A., emadali, L., eftekhari, N., & mahmudian, H. (2024). [Determining the natural frequency of Behbahan city soil using microtremor data analysis](#). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 233-251. [In Persian]
- [30] Motaghed, S., Shahid zadeh, M. S., khooshecharkh, A., & Askari, M. (2022). [Implementation of AI for The Prediction of Failures of Reinforced Concrete Frames](#). *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application*, 5(2), 1-7.
- [31] Motaghed, Sasan & Eftekhari, Nasrollah & Mohammadi, Mohammad & Khazae, Mozghan. (2023). [Logic tree branches' weights in the probabilistic seismic hazard analysis: the need to combine inter-subjective and propensity probability interpretations](#). *Journal of Seismology*. 27. 1-12.
- [32] Moteghad, S., & Eftekhari, N. (2023). [Earthquake hazard and risk analysis with OpenQuake engine: With practical examples](#). Behbahan University of Technology Press. [In Persian]
- [33] Mousavi, M. and Bayramzadeh, N. (2024). [Spatial analysis of the vulnerability of human settlements against earthquakes \(Case study: West Azarbaijan province\)](#). *Safe City*, 7(3), 1-13. [In Persian]
- [34] Naghdi A, Mafia E, vatanparast M. (2021). [Analysis of status of resilience indices in urban fabric \(Case study: Faruj worn out fabric\)](#). *Jgs*, 21 (60) :219-238. [In Persian]
- [35] Neghabat, F. and Liu, S.C. (1977) *Earthquake regionalization of Iran*. 6th World Conference on Earthquake Engineering. New Delhi, India, 859-865.
- [36] Pachakis, D., & Kiremidjian, A. S. (2004). [Estimation of downtime-related revenue losses in seaports following scenario earthquakes](#). *Earthquake Spectra*, 20(2), 427-449.
- [37] Silva V., Casotto C., Rao A., Villar M., Crowley H., Vamvatsikos D. (2015). *OpenQuake Risk Modeller's Toolkit – User Guide*. GEM Technical Report 2015-09. Global Earthquake Model Foundation, Pavia, Italy.
- [38] Sun, C. G., Chun, S. H., Ha, T. G., Chung, C. K., & Kim, D. S. (2008). [Development and application of a GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction](#). *Computers and Geotechnics*, 35(3), 436-449.
- [39] Tamizi, M., Aref Jahan-Nejad, & Beheshti Asl, Y. (2015). Review of principles and concepts of sustainable architecture in traditional houses: The case study of traditional houses in Behbahan. In *Proceedings of the International Congress on Sustainability in Architecture and Urbanism* (Dubai). [In Persian]
- [40] Tavakoli, B., & Favakoli, A. (1993). [Estimating the vulnerability and loss functions of residential buildings](#). *Natural Hazards*, 7(2), 155-171.
- [41] UN/ISDR. (2012). UN/ISDR (United Nations International Strategy for Hazard Reduction)(2012). 2012 UN/ISDR Terminology on Hazard Risk Reduction.
- [42] Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., ... & SHARE consortium. (2015). [The 2013 European seismic hazard model: key components and results](#). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 3553-3596.
- [43] Zeng, C., Zhao, C., & Zeighami, F. (2022). [Seismic surface wave attenuation by resonant metasurfaces on stratified soil](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(5), 1201-1223.
- [44] Zhao, J. X. (2006). [Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period](#), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 898-913.
- [45] Zolfegharifar, S., & Bosak, M. (2016). [Tectonic and Seismotectonics Survey in Behbahan](#). *Open Journal of Geology*, 6(02), 103.