Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Probabilistic seismic hazard analysis and preparation of acceleration zoning maps: a case study of Shahid Rajaei Port

Maedeh Roshan Liarajdameh[1]✉, Milad Davari Sarem[2]

1. Ph.D. Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: maedeh.roshan.li@ut.ac.ir
2. Expert at the Engineering and Infrastructure Affairs Development Department, Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran. E-mail: mdavarisarem@pmo.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 June 2025
Accepted 27 August 2025

Keywords: Shahid Rajaei Port, Acceleration Zoning, Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Earthquake, Response Spectrum.

ABSTRACT

Due to its location between two active tectonic plates, Iran has always been exposed to numerous earthquakes. The occurrence of over than 100 severe earthquakes in the past century indicates the country's high level of vulnerability to this natural hazard. This study aims to analyze the seismicity and assess the earthquake hazard in Shahid Rajaei Port, as the largest commercial port in Iran. Located at the intersection of the North-South transit corridor, Shahid Rajaei Port is a vital infrastructure in this region, and enhancing its resilience and sustainability is a fundamental step. In this study, all seismic events occurring within a 200-kilometer radius of the site were used, along with the Knopoff and Ez-Frisk software. Statistical analysis of historical and instrumental earthquakes indicates a high seismic activity in the region, characterized by moderate earthquakes with short recurrence intervals, such that earthquakes with magnitudes between four and five on the Richter scale constitute significant proportion of these events. The probabilistic hazard assessment estimated the maximum horizontal and vertical accelerations as 0.385 and 0.290 (g), respectively. Additionally, the site response spectrum was prepared based on the accelerographs from the Tabas earthquake and the isoacceleration maps of the study area, generated at intervals of 1.0 degrees in both the latitude and longitude directions. The results showed that the study area has a seismic hazard of 0.85 (g), which is higher than the standard values specified in Iran's Code 2800, placing it within the very high relative hazard zone. Therefore, implementing risk-based approaches in infrastructure development helps optimize port design and reduce earthquake-related damages.

Introduction

An earthquake is one of the most destructive natural hazards whose occurrence can cause extensive damage and casualties in a very short period of time. More than 25,000 people worldwide lose their lives due to earthquakes each year (Davari Sarem et al., 2022). Due to its location between two active tectonic plates, Iran has always been exposed to numerous earthquakes, and the occurrence of more than 100 severe earthquakes in the last century indicates the high vulnerability of the country to this natural hazard. On the other hand, ports are among the fundamental and vital infrastructures to the global economy and transportation, playing a significant role in a country's development. Shahid Rajaei Port, Iran's largest commercial port and its most important gateway for imports and exports, plays a key role in the movement of goods, economic exchanges, and international trade. Given the high importance of Shahid Rajaei Port in the national and regional economy, analyzing various hazards, including earthquakes, is a critical factor affecting the resilience and safety of port facilities. Therefore, conducting a seismicity analysis an earthquake hazard assessment at Shahid Rajaei Port is a fundamental step toward increasing the

Cite this article: Roshan Liarajdameh, M., Davari Sarem, M. (2025). Probabilistic seismic hazard analysis and preparation of acceleration zoning maps: a case study of Shahid Rajaei Port. Journal of Engineering Geology, 19 (2), 159-182. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1020361

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1020361

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

resilience and sustainability of the vital infrastructure in the region. To achieve this goal, this study has conducted a probabilistic hazard analysis and prepared acceleration zoning maps within a 200-kilometer radius around Shahid Rajaei Port.

Materials and Methods

According to Figure 1, the process of determining earthquake hazard and preparing the response spectrum and the regional isoacceleration maps has been carried out based on a set of data. The aim of the seismicity studies is to estimate ground motion parameters (acceleration, velocity, and ground displacement) at the project site, determine the frequency and return period of earthquakes of various magnitudes, and specify the design basis acceleration, design basis earthquake, and the maximum probable earthquake. In this regard, in order to achieve the intended objectives and obtain the required parameters, the following study steps have been undertaken:

1- Review of previous studies within the project area to understand the overall seismicity and seismotectonic conditions of the region;

2- Collection of all seismic events that have occurred within a 200-kilometer radius of the study area;

3- Statistical analysis of historical and instrumental earthquakes and precise identification of the seismic characteristics of the region;

4- Identification of all main faults and seismic sources within the study area;

5- Use of probabilistic methods to estimate earthquake hazard at the site using the Ez-Frisk software.

Results and Discussion

The maximum expected earthquake magnitudes within a 200-kilometer radius of the port were calculated for different return periods using the relationship derived from the Gutenberg-Richter diagram within the study area and at the time of data collection. The results are presented in Table 2. As shown in Figure 7, the return period for earthquakes with a magnitude of approximately 7.5 is about 117 years, while earthquakes with a magnitude of 5 Richter have a return period of approximately 1.27 years. To estimate the maximum horizontal acceleration, the attenuation relationships of Abrahamson and Silva, 2008 with a weight of 15%, Boore and Atkinson, 2008 with 30%, Campbell and Bozorgnia, 2008 with 35%, and Ambraseys et al., 2005 with 20% were used. For estimating the maximum vertical acceleration, the relationships of Abrahamson and Silva, 1997 with a weight of 25%, Campbell and Bozorgnia, 2003 with 40%, and Ambraseys et al., 2005 with 35% were applied. In the final calculations, a logic tree approach was employed to weight the different models in order to compensate for the deficiencies in the Iranian earthquake data and to provide conservative values for large distances. Table 6 presents the horizontal and vertical acceleration values obtained from the probabilistic hazard analysis for various return periods. In this study, the site response spectrum was calculated based on the accelerographs of the Tabas earthquake at four stations: Bajestan, Boshruyeh, Ferdows, and Kashmar. According to geotechnical boreholes at the site, the study area is classified as Class 3 based on the 2800 code (Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2015). Additionally, due to the tectonic conditions, the focal depth of most recorded earthquakes is considered to be less than 25 kilometers. To prepare the isoacceleration maps of the study area, the region was gridded at intervals of 1.0 degrees in both latitude and longitude, and seismic hazard analysis was performed at each grid point.

Conclusions

Studies indicate that the maximum horizontal and vertical accelerations of the design basis earthquake (with a return period of 475 years) are 0.385 and 0.290 (g), respectively.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

This suggests a direct influence of active faults on the region's seismic activity. Conversely, the distribution of earthquakes roughly corresponds to the tectonic structures (faults) of the area, as shown on the seismotectonic map. The M.F.F., H.Z.F., M.Z.R.F., Minab, Pashgiram, and Sabzevaran faults, as well as other geological structures, play a significant role in seismic events and the region's geology. According to the 2800 code, the study area is in a zone of relatively high seismic hazard. Therefore, the design basis acceleration is approximately 0.30 g. However, the present research indicates that this area has a higher seismic hazard than the standard value in the Iranian code. This places the area within a zone of very high relative hazard. The study area is highly seismically active due to the presence of long faults, primarily with thrust mechanisms. Numerous earthquakes have occurred in this region, providing evidence of this activity. . According to the calculations performed, the faults in the area have the potential to generate earthquakes with a magnitude of up to 6.5, which, considering the seismic history of the region and the specified return period, is not unexpected. However, the occurrence of earthquakes with larger magnitudes is considered unlikely. Such earthquakes are probable if ruptures occur along the M.Z.R.F., Minab and Pashgiram faults. The characteristics of the earthquakes that have occurred within the project area indicate moderate magnitude events with short return periods and depths less than 25 kilometers, with earthquakes between magnitude 4 and 5 Richter accounting for the majority. Utilizing the results of the seismic hazard analysis from this study, especially the seismic acceleration data, as a key factor in the evaluation and zoning of liquefaction hazard, is a research pathway that can help complete this study. Furthermore, the results highlight the necessity of adopting appropriate engineering and managerial measures to reduce earthquake risks and enhance the safety of structures.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

دانشگاه خوارزمی

تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شتاب: مطالعه موردی بندر شهید رجایی

مائده روشن لیارجدمه [۱] ✉، میلاد داوری صارم [۲]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: maedeh.roshan.li@ut.ac.ir
۲. کارشناس معاونت مهندسی و توسعه امور زیربنایی، سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران. رایانامه: mdavarisarem@pmo.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

کلیدواژه‌ها:
بندر شهید رجایی، پهنه‌بندی شتاب، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی، زمین‌لرزه، طیف پاسخ.

چکیده

ایران به دلیل قرارگیری در میان دو صفحه تکتونیکی فعال، همواره در معرض زمین‌لرزه‌های متعدد بوده و وقوع بیش از ۱۰۰ زلزله شدید در قرن اخیر، بیانگر میزان خطرپذیری بالای کشور در برابر این مخاطره طبیعی است. هدف این پژوهش تحلیل لرزه‌خیزی و ارزیابی خطر زلزله در بندر شهید رجایی، به‌عنوان بزرگ‌ترین بندر تجاری ایران (واقع در محل تلاقی کریدور ترانزیتی شمال – جنوب) است که گامی اساسی در افزایش تاب‌آوری و پایداری زیرساخت‌های حیاتی این منطقه خواهد بود. در این مطالعه از تمامی وقایع لرزه‌ای رخداده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری ساختگاه و نرم‌افزارهای Knopoff و Ez-Frisk استفاده شده است. بررسی آماری زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی حاکی از لرزه‌خیزی بالای منطقه بوده که شاخصه آن زلزله‌هایی با بزرگای متوسط با دوره بازگشت کوتاه‌مدت است، به‌نحوی‌که زلزله‌هایی با بزرگای بین چهار تا پنج ریشتر، سهم بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. برآورد خطر به روش احتمالاتی مقادیر بیشینه شتاب‌های افقی و قائم را به ترتیب (g) ۰/۳۸۵ و ۰/۲۹۰ نشان داد. همچنین طیف پاسخ ساختگاه بر اساس شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه طبس و نقشه‌های هم‌شتاب گستره موردمطالعه به فواصل ۱/۰ درجه در جهت طولی و عرضی جغرافیایی تهیه گردید. نتایج نشان داد که محدوده مطالعاتی، به مقدار (g) ۰/۸۵ از خطر لرزه‌ای بالاتری نسبت به مقدار استاندارد در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران برخوردار است به‌نحوی‌که در پهنه خطر نسبی خیلی زیاد جای می‌گیرد. بدین سبب اجرای رویکردهای مبتنی بر ریسک در توسعه زیرساخت‌ها، کمک می‌کند تا بنادر به‌صورت بهینه طراحی شوند و میزان خسارات ناشی از زلزله کاهش یابد.

مقدمه

زمین‌لرزه یکی از مخاطرات طبیعی است که رخداد آن می‌تواند در مدت‌زمان کوتاهی خسارات و تلفات بسیار گسترده‌ای بر جای گذارد. به‌طوری‌که هرساله در سطح جهان بیش از ۲۵ هزار نفر به علت زمین‌لرزه جان خود را از دست می‌دهند (Davari Sarem et al., 2022). ایران نیز به دلیل قرارگیری در میان دو صفحه تکتونیکی فعال، همواره در معرض زمین‌لرزه‌های متعدد بوده و وقوع بیش از ۱۰۰ زلزله شدید در قرن اخیر، بیانگر میزان خطرپذیری بالای کشور در برابر این مخاطره طبیعی است. به‌طورکلی دلایل وقوع زمین‌لرزه‌ها و رفتار امواج آن‌ها در مکان‌های مختلف تابعی از شرایط ایجادکننده و حاکم بر منطقه و مسیر عبور امواج از لایه‌ها و ساختارهای پیچیده زیرسطحی است که درکل امری بسیار پیچیده است. ازاین‌رو علی‌رغم مطالعات گسترده‌ای که در ارتباط با زلزله‌ها صورت پذیرفته است، تاکنون امکان

استناد: روشن لیارجدمه، م.، داوری صارم، م. (۱۴۰۴). تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شتاب: مطالعه موردی بندر شهید رجایی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۲)، ۱۵۹-۱۸۲. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1020361

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

پیش‌بینی دقیق زمان وقوع و بزرگی آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین برای پیش‌بینی و کاهش خطرات ناشی از این پدیده تحلیل خطر زلزله ابزاری کارآمد بشمار می‌رود (Sivandipour et al.,2012; Eftekhari et al., 2022; Motaghed et al., 2024). از سوی دیگر بنادر از جمله زیرساخت‌های اساسی و حیاتی در اقتصاد و حمل‌ونقل جهانی محسوب می‌شوند که تأثیر به سزایی در توسعه کشورها دارند. بندر شهید رجایی، به‌عنوان بزرگ‌ترین بندر تجاری ایران و مهم‌ترین دروازه واردات و صادرات جمهوری اسلامی ایران، نقش کلیدی در جابه‌جایی کالاها، تبادلات اقتصادی و تجارت بین‌المللی ایفا می‌کند. این بندر با برخورداری از موقعیت جغرافیایی منحصربه‌فرد در نزدیک‌ترین نقطه به تنگه هرمز و دهانه ورودی خلیج‌فارس، به دلیل فاصله کوتاه از مسیر اصلی تردد بین‌قاره‌ای کشتی‌ها، در محل تلاقی کریدور ترانزیتی شمال - جنوب قرار گرفته و به همین دلیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین با برخورداری از بزرگ‌ترین پایانه کانتینری کشور، ارتباط تجاری گسترده‌ای با بنادر جهانی دارد. توسعه زیرساخت‌های بندری، افزایش کارایی عملیاتی، جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و توسعه اراضی لجستیکی و صنعتی از جمله اقداماتی بوده‌اند که نقش این بندر را در تجارت جهانی ارتقا داده‌اند و فرصت‌های جدیدی برای افزایش صادرات مجدد و ارائه خدمات ارزش افزوده فراهم کرده‌اند. با توجه به اهمیت بالای بندر شهید رجایی در اقتصاد ملی و منطقه‌ای، تحلیل مخاطرات مختلف از جمله زمین‌لرزه، عاملی تأثیرگذار بر پایداری و ایمنی تأسیسات بندری محسوب می‌شود؛ بنابراین، تحلیل لرزه‌خیزی و ارزیابی خطر زلزله در بندر شهید رجایی، گامی اساسی در افزایش تاب‌آوری و پایداری زیرساخت‌های حیاتی این منطقه خواهد بود. در همین راستا، پژوهش‌های متعددی بر روی خطر لرزه‌ای بنادر انجام شده است. مطالعه مربوط به بنادر ایالت گجرات هند تأکید می‌کند که استفاده از روش‌های احتمالاتی (PSHA) و تعینی (DSHA)، امکان ارائه ارزیابی دقیق از مخاطرات لرزه‌ای را فراهم می‌کند (Shukla and Choudhury, 2012). پژوهش انجام‌شده در بندر انزلی از روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای فازی بهره گرفته است و نشان داده که مدل‌های مبتنی بر عدم قطعیت، نتایج دقیق‌تری در تخمین خطر زلزله ارائه می‌دهند. این تحقیق بر ضرورت استفاده از روش‌های نوین در ارزیابی خطر لرزه‌ای تأکید دارد (Afsari et al., 2022). همچنین، تحلیل بندر سیراف که از رویکرد ریسک محور مطابق با استاندارد ۱۰-ASCE۰۷ بهره برده، نشان داده است که مقادیر پیشنهادی برای طراحی مقاوم‌سازی ممکن است با آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران تفاوت داشته باشند. این مطالعه، مدل‌سازی لرزه‌ای را با بررسی توزیع‌های پوآسونی زلزله‌ها و تحلیل داده‌های تاریخی تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری منطقه انجام داده است. یافته‌ها نشان داده‌اند که برخی مناطق از خطر لرزه‌ای بالاتری نسبت به مقدار استاندارد در آیین‌نامه ایران برخوردارند (Mohammadian, 2020). علاوه بر این، پژوهش پرویزی و شعاعی (Parvizi and Shoaei, 2017) به بررسی لرزه‌خیزی شهر بندرعباس پرداخته و تحلیل احتمالاتی خطر زلزله در این منطقه با استفاده از روش‌های گوتنبرگ - ریشتر و کیکو سالیوال انجام شده است. بر اساس این بررسی‌ها، دوره‌های بازگشت ۵۰ تا ۲۴۷۵ سال برای سطح‌های مختلف طراحی سازه‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین، نقشه‌های هم‌شتاب، هم‌سرعت و هم‌جابه‌جایی برای ارزیابی تأثیرات زمین‌لرزه بر سازه‌های شهری بندرعباس تهیه شده‌اند که می‌توانند در بهینه‌سازی استانداردهای مقاوم‌سازی مورداستفاده قرار گیرند. علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2023) از نرم‌افزار Ez-Frisk به جهت تحلیل خطر احتمالی شهر اردبیل بهره بردند. در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و بر مبنای گسل‌های موجود، ۷ چشمه خطی و ۲۳ چشمه پهنه‌ای مشخص شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

همچنین نقشه خطر زلزله برای بیشترین شتاب زمین روی سنگ‌بستر با ۱٪ میرایی برای دوره بازگشت ۵۰ و ۴۷۵ سال در مجموعه نقاط شبکه‌بندی انجام شد. با توجه به شتاب ناشی از زلزله احتمالی تعیین شده برای محدوده شهر اردبیل، این ناحیه به ۴ ریز پهنه تقسیم شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر شتاب در این محدوده از ۰/۱۹ در شمال تا ۰/۲۱ در جنوب غربی متغیر است. مطالعات صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2024) نشان می‌دهد که استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در استان هرمزگان با کاهش خطاهای ناشی از اطلاعات نامطمئن و تنظیم دقیق اوزان معیارها، ابزار مناسبی برای شناسایی مناطق در معرض خطر بالا است. در این پژوهش خطر وقوع زمین‌لرزه استان هرمزگان در پنج سطح بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم با استفاده از هشت پارامتر شامل فاصله از خطوط گسل، تراکم خطوط گسل، فاصله از کانون‌های زمین‌لرزه، تراکم کانون‌های زمین‌لرزه، بزرگی زمین‌لرزه، عمق کانونی زمین‌لرزه، شیب زمین و ارتفاع ارزیابی شد.

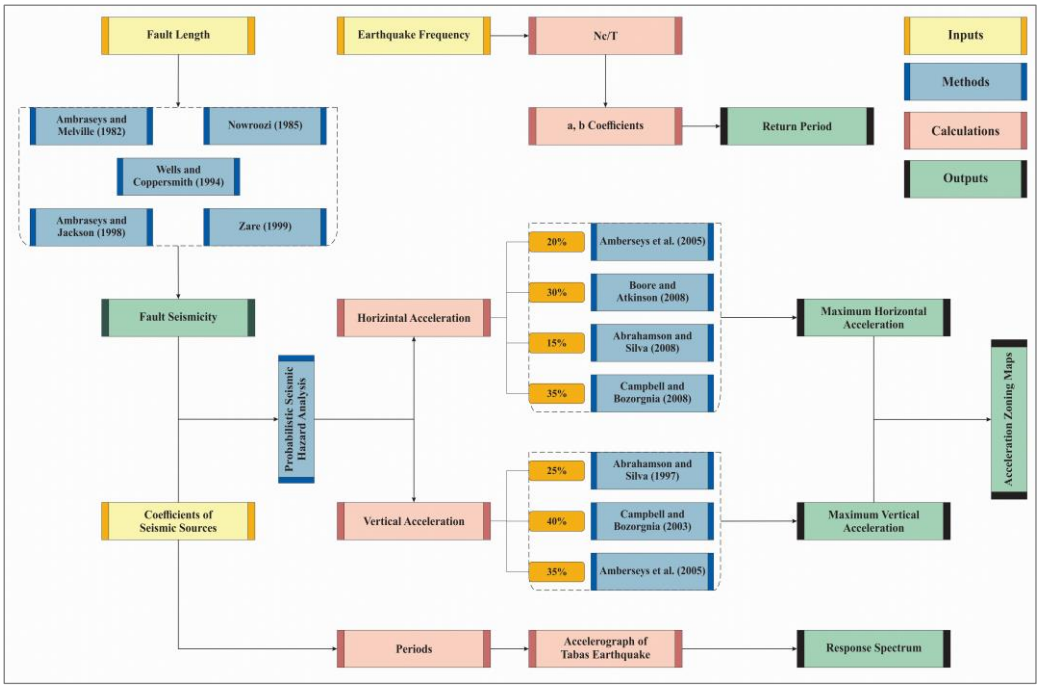
اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار نشان داد که فاصله از گسل‌ها و تراکم خطوط گسل به ترتیب با ضریب وزنی ۲۹/۹۴ درصد و ۱۸/۱۸ درصد، مهم‌ترین معیارهای تأثیرگذار بر خطر وقوع زمین‌لرزه در منطقه هستند و ارتفاع زمین با ۱/۸۸ درصد کمترین تأثیر را داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که بیش از ۵۶ درصد از مساحت استان در معرض خطر بالا قرار دارد و نقاط پرجمعیت نیز جزو مناطق با ریسک بالاتر هستند. این یافته‌ها لزوم برنامه‌ریزی‌های مقاوم‌سازی و مدیریت بحران را برجسته می‌کنند.

در جهت نیل به هدف مذکور، این پژوهش به تحلیل خطر احتمالاتی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه در گستره شعاعی ۲۰۰ کیلومتری بندر شهید رجایی پرداخته است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به بهبود روش‌های شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا با استفاده از داده‌های به‌روز لرزه‌نگاری و زمین‌شناسی و نیز به‌کارگیری رویکرد احتمالاتی که به طور صریح احتمال هر یک از پارامترهای مورداستفاده برای برآورد جنبش شدید زمین نظیر بزرگا، فاصله، عدم قطعیت رابطه کاهندگی و نرخ رویداد زمین‌لرزه را در نظر گرفته و بر اساس نتایج حاصل از آن مقادیر جنبش شدید به ازاء سطوح (احتمال رویداد مختلف) خطر لرزه‌ای را بیان می‌کند، اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف و روش به ترتیب از نوع کاربردی و تحلیلی - توصیفی است. برای انجام این مطالعه از داده‌های زمین‌لرزه‌های ثبت شده دستگاهی منطقه برگرفته از وبگاه‌های معتبر IIEES (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله)، ISC (مرکز بین‌المللی لرزه‌شناسی)، NEIC (مرکز اطلاع‌رسانی زمین‌لرزه‌های ملی) و ژئوفیزیک دانشگاه تهران (بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۲ میلادی)، استفاده شده است. داده‌های دستگاهی زلزله‌های به‌کاررفته در منطقه، شامل جزئیاتی از قبیل: تاریخ، زمان، عرض و طول جغرافیایی، عمق و بزرگی است. مطابق شکل ۱ روند تعیین خطر زمین‌لرزه و تهیه طیف پاسخ تجربی و نقشه‌های هم‌شتاب منطقه موردمطالعه بر اساس مجموعه‌ای از داده‌ها انجام شده است. هدف از مطالعات لرزه‌خیزی برآورد پارامترهای جنبش زمین (شتاب، سرعت و تغییر مکان‌های زمین) در محل طرح، تعیین فراوانی و دوره بازگشت زلزله‌های با بزرگی مختلف و تعیین شتاب مبنای طرح، زلزله مبنای طرح و بزرگ‌ترین زلزله محتمل است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق و داده‌های مورداستفاده در این مطالعه

Fig. 1. Flowchart of the research method and data used in this study

در این راستا جهت دستیابی به اهداف موردنظر و دستیابی به پارامترهای موردنیاز، مراحل مطالعاتی زیر طی شده است:

۱- بررسی مطالعات پیشین در گستره طرح، جهت شناخت وضعیت کلی لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساختی منطقه؛

۲- جمع‌آوری کلیه وقایع لرزه‌ای رخداده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری منطقه طرح؛

۳- بررسی آماری زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی و شناخت دقیق ویژگی‌های لرزه‌خیزی منطقه؛

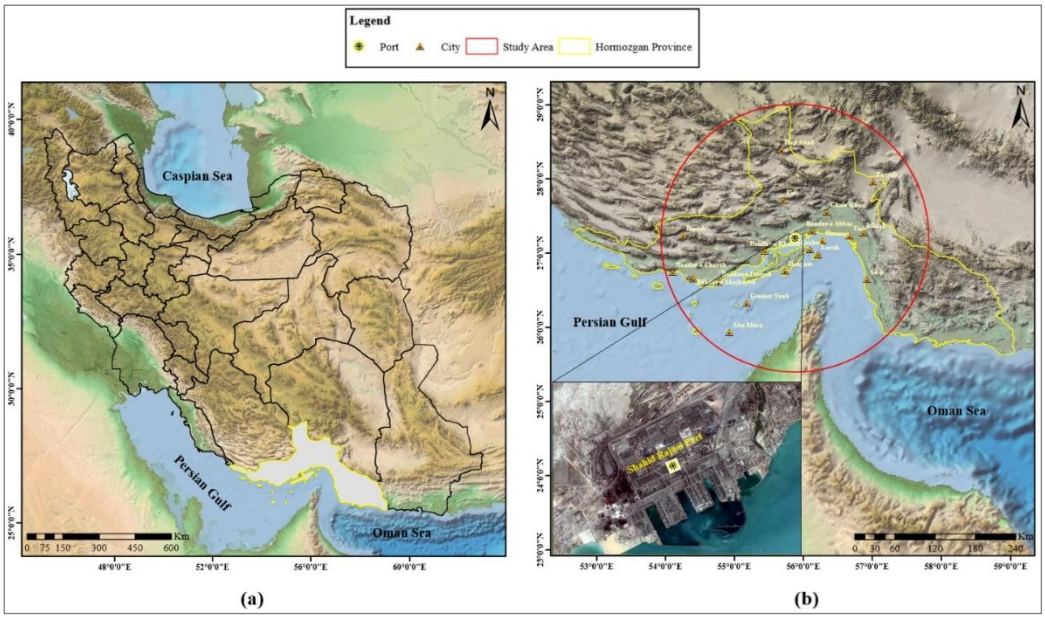
۴- شناخت کلیه گسل‌ها و چشمه‌های لرزه‌زای مهم در محدوده موردمطالعه؛

۵- استفاده از روش احتمالاتی برای برآورد خطر زمین‌لرزه در ساختگاه با استفاده از نرم‌افزار Ez-Frisk.

موقعیت جغرافیایی بندر شهید رجایی

مجتمع بندری شهید رجایی در استان هرمزگان، در فاصله ۲۳ کیلومتری شهر بندرعباس و به طور تقریبی در نقطه مرکزی نوار ساحلی جنوب کشور واقع شده است (شکل ۲). این بندر با بیش از ۲۳۰۰ کیلومتر مرز دریایی، یکی از مهم‌ترین قطب‌های حمل‌ونقل دریایی کشور محسوب می‌شود و با بیش از ۸۰ بندر معروف جهان از طریق ۳۵ خط برتر کانتینری دنیا تبادل کالا و مراوده بازرگانی دارد. موقعیت راهبردی بندر شهید رجایی در مجاورت صنایع بزرگ، تأسیسات انرژی نظیر پالایشگاه و نیروگاه برق و همچنین برخورداری از زیرساخت‌های حمل‌ونقل زمینی، هوایی و اتصال به شبکه بین‌المللی راه‌آهن و جاده تاریخی ابریشم، نقش این بندر را در اقتصاد کشور دوچندان کرده است. این بندر با وسعتی بالغ بر ۴۵۱۰ هکتار و ظرفیت پذیرش سالانه ۱۰۰ میلیون تن کالا، یکی از مراکز مهم لجستیکی و ترانزیتی منطقه به شمار می‌رود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی؛ a) استان هرمزگان، b) بندر شهید رجایی
Fig. 2. The geographical location; a) Hormozgan Province, b) Shahid Rajaei Port

زمین‌شناسی

منطقه موردمطالعه در زون زاگرس و زیر زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. این زون از دیدگاه زمین‌شناسی شامل رسوبات دوران پالئوزوئیک، مزوزوئیک و ترشیاری است که به‌صورت هم‌شیب روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. از نظر چینه‌شناسی این منطقه شامل نهشته‌های کواترنری، سازندهای بختیاری، آغاجاری، میشان و مجموعه هرمز است. روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی در این منطقه شمال غربی - جنوب شرقی بوده و در طول دوره‌های زمین‌شناسی، این ناحیه تحت تأثیر رویدادهای تکتونیکی متعدد قرار گرفته است. ویژگی‌های زمین‌شناسی این ناحیه تأثیر مهمی بر تحلیل خطر زلزله در بندر شهید رجایی دارد، زیرا ساختارهای چین‌خورده، ضخامت لایه‌های رسوبی و حضور گسل‌های فعال همگی از عوامل تأثیرگذار در ارزیابی لرزه‌خیزی این منطقه به شمار می‌روند.

گسل‌های لرزه‌زای منطقه

زمین‌لرزه‌های ایران عمدتاً ناشی از گسل‌های جنبا هستند که شکستگی‌هایی در پوسته زمین ایجاد کرده و جابه‌جایی‌های قابل‌توجهی رخ داده است. این گسل‌ها در عمق نسبتاً کم شکل می‌گیرند و با گذر از مناطق شکننده، به لایه‌های شکل‌پذیرتر می‌رسند. در منطقه موردمطالعه، چندین گسل لرزه‌زا که در گذشته نیز موجب زلزله شده‌اند وجود دارد. علاوه بر آن گسل‌های کوچک‌تری نیز دیده می‌شوند که احتمالاً لرزه‌زا نیستند و فقط ممکن است تحت تأثیر گسل‌های بزرگ‌تر حرکت‌های کوچکی داشته باشند. از همین رو مشخصات گسل‌های گستره مطالعاتی به شرح جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نقشه گسل‌های منطقه (شکل ۳)، در گستره موردمطالعه گسل‌های مهمی وجود دارد که خصوصیات آن‌ها به شرح زیر است:

گسل لبه گودال زاگرس (M.F.F.): از شمال شرق بندرعباس تا عراق امتداد دارد، دارای سازوکار معکوس است و زمین‌لرزه‌های قابل‌توجهی را تجربه کرده است، از جمله در اهواز، هرمز، بندرعباس و زرباطیه که با بزرگای گشتاوری بین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

۶٫۳ تا بیش از ۶٫۵ و شدت تا ۸ ریشتر رخ داده‌اند (Berberian, 1995).

گسل خمش لبه کوهستانی زاگرس (H.Z.F.): گسل فشاری پنهان و لرزه‌زا است که موجب تغییر شکل لبه کوهستان زاگرس می‌شود. این گسل در سطح زمین قابل‌مشاهده نیست، اما اختلاف ارتفاع دو سوی آن نشان‌دهنده تأثیر آن است.

گسل فراقون (Fa.F.): با طول ۹۲ کیلومتر، در شمال بندرعباس قرار دارد و دارای دو راستای اصلی است. این عارضه به گسل معکوس اصلی زاگرس متصل شده و در امتداد تاقدیس زهرکان و گسل زاگرس مرتفع واقع شده است.

گسل گهکم (Ga.F.): با طول تقریبی ۹۷ تا ۱۳۰ کیلومتر، در جنوب حاجی‌آباد و شمال غرب بندرعباس قرار دارد. این گسل با سازوکار معکوس، سبب بریدگی و جابه‌جایی گسل زاگرس مرتفع و محور چین‌خوردگی‌های اطراف شده است.

گسل معکوس اصلی زاگرس (M.Z.R.F.): با طول ۱۳۵۰ کیلومتر، مرز میان کمربند زاگرس و پهنه فرورانش مکران را مشخص می‌کند. این گسل که از مریوان تا بندرعباس امتداد دارد، تأثیر زیادی بر زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی و ساختار منطقه دارد و نشانه‌هایی از جابه‌جایی واحدهای زمین‌شناسی مختلف در مسیر خود دارد (Berberian, 1995).

جدول ۱. مشخصات گسل‌های واقع در گستره مطالعاتی

Table 1. Specifications of faults located in the study area

Fault Name	Length (km)	Distance from Fault to Site (km)	Fault Strike	Fault Mechanism	Seismic Activity
M.F.F.	105	1	NW-SE	Thrust	Yes
H.Z.F.	115	14			
Faraghoun (Fa.F.)	92	110			
Gahkom (Ga.F.)	97	100	E-W		
M.Z.R.F.	250	49	NW-SE		
Darbagh (Db.F.)	44	100	E-W		
Palami (Pa.F.)	22	110	N-S		
Minab (Mi.F.)	200	98	NW-SE	Strike-Slip	
Deraz (De.F.)	40	95	N-S	Thrust	
Darpahn (Dp.F.)	58	98	NW-SE		
Beshnow (Be.F.)	25	105	E-W		
Dargan (Dg.F.)	44	100	NW-SE		
Ashkan (As.F.)	22	110			
Pashgiram (Pg.F.)	153	90			
Rudan (Ru.F.)	48	177			
Sabzevaran (Sa.F.)	170	125	N-S		
Jiroft (Ji.F.)	130	184	NW-SE		
Bakhtegan (Ba.F.)	25	200			
Bandkalani (Bk.F.)	78	190			

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

گسل درباغ (Db.F.): به طول ۴۴ کیلومتر، با راستای شرقی - غربی و شیب شمالی، در شرق حاجی‌آباد قرار دارد و موجب رانش افیولیت‌های کرتاسه بر واحدهای کواترنر می‌شود.

گسل پالامی (Pa.F.): در شمال میناب، با سازوکار معکوس، میان گسل‌های زاگرس و میناب قرار دارد و احتمالاً شاخه‌ای از گسل زاگرس است.

گسل میناب (Mi.F.): یک گسل راستا لغز و ترافشاری با طول حدود ۲۰۰ کیلومتر است که از زاگرس تا دریای عمان امتداد دارد و دارای شیب به سمت شرق است (Falcon, 1967). این گسل از اوایل کواترنری به‌صورت رورانده فعال بوده و حرکت راستا لغز نداشته است (Regard et al., 2005).

گسل دراز (DE.F.): با طول ۴۰ کیلومتر، در جنوب شرقی میناب، استان هرمزگان قرار دارد و با شیب ۳۰ درجه به سمت جنوب غربی امتداد می‌یابد. این گسل آبرفت‌های کواترنری و سازند آغاجاری را قطع کرده و مرز آمیزه‌های افیولیتی کرتاسه و نهشته‌های آواری میوسن را تشکیل می‌دهد. همچنین، گسل سبزواران در انتهای جنوبی خود با این گسل برخورد دارد.

گسل درپهن (Dp.F.): با طول ۵۸ کیلومتر در جنوب شرقی میناب، استان هرمزگان قرار دارد و دارای راستای شمال غرب - جنوب شرق و سازوکار معکوس است. این گسل واحدهای زمین‌شناسی دوره میوسن را قطع کرده و ساختارهای همراه آن به‌موازات درگان مشاهده می‌شوند.

گسل بشنو (Be.F.): به طول ۲۵ کیلومتر، در جنوب شرقی میناب قرار دارد و ساختارهای اطراف آن شامل گسل‌های اشکان و درگان و ناودیس بندچاکر هستند.

گسل درگان (Dg.F.): به طول ۴۴ کیلومتر، در جنوب شرقی میناب در استان هرمزگان قرار دارد و دارای سازوکار معکوس است. این گسل مرز میان آمیزه‌های رسوبی و واحدهای سنگی میوسن را تشکیل داده و به‌موازات گسل میناب امتدادیافته است.

گسل اشکان (As.F.): یک گسل معکوس ۲۲ کیلومتری در جنوب شرقی میناب است که با سنگ‌های الیگومیوسن و میوسن در تعامل بوده و در کنار گسل‌های بشنو و درگان و چین‌خوردگی‌های بند چاکر، رینان و دورینام قرار دارد.

گسل پاشگیرام (Pg.F.): این گسل در جنوب شرقی میناب قرار دارد و مرز میان سنگ‌های کرتاسه تا میوسن را تشکیل می‌دهد. همراه با سایر گسل‌های منطقه جازموریان، باعث چین‌خوردگی و افزایش مجموعه‌های افیولیتی شده است.

گسل رودان (Ru.F.): به طول ۴۸ کیلومتر، دارای راستای خمیده شمال‌غربی - جنوب شرقی و سازوکار معکوس است. این گسل سنگ‌های دگرگونی را روی آمیزه‌های کرتاسه قرار داده و مرز میان سنگ‌آهک‌های کرتاسه و دگرگونه‌های کرتاسه بالایی را مشخص می‌کند. همچنین، به گسل سبزواران متصل می‌شود.

گسل سبزواران (Sa.F.): با طول ۱۷۰ کیلومتر و سازوکار راستا لغز راست‌بر در پیرامون جیرفت و کهنوج قرار دارد. این گسل موجب ایجاد دگرشکلی فعال و حوضچه‌های گسلی شده و احتمالاً در شکل‌گیری حوضه فروافتادهٔ جازموریان نقش داشته است (Regard et al., 2004). نرخ لرزش امروزی آن حدود ۳ میلی‌متر در سال است، اما در دوره کواترنری این نرخ ۶ میلی‌متر در سال بوده است (Bayer et al., 2006).

گسل جیرفت (Ji.F.): با طول ۱۳۰ کیلومتر، از میان شهر جیرفت می‌گذرد و گسل فعالی است؛ اما مدت‌هاست فعالیتی نداشته است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

گسل بختگان (Ba.F.): طول این گسل نزدیک به ۲۵ کیلومتر بوده و راستای آن شمال غربی - جنوب شرقی است.

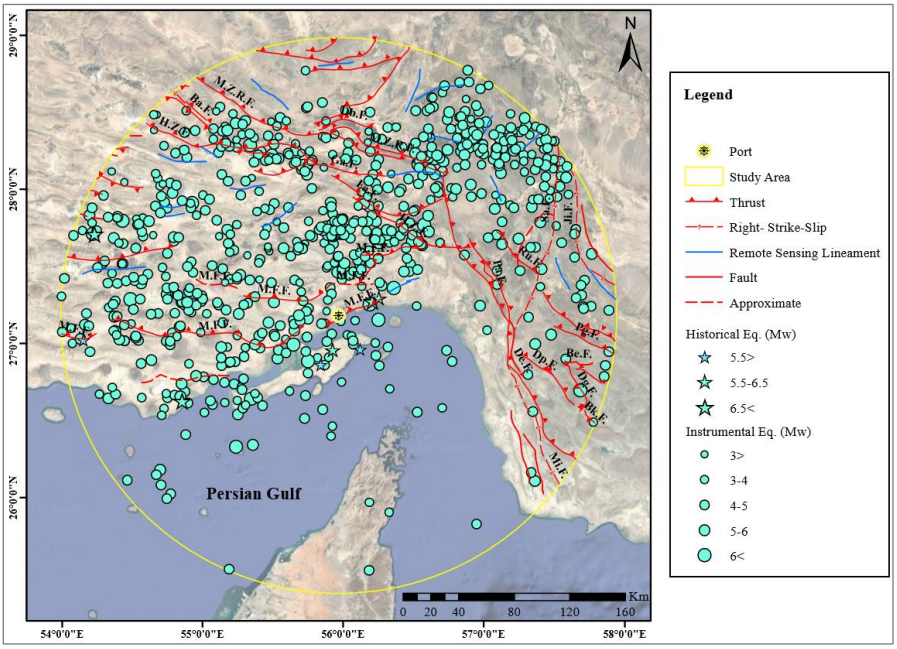
گسل بندر کلانی (Bk.F.): طول گسل بندر کلانی ۷۸ کیلومتر بوده و راستای شمال غربی - جنوب شرقی است.

لرزه‌خیزی منطقه موردمطالعه

بر اساس طبقه‌بندی‌های انجام شده برای سراسر جهان، لرزه‌خیزی در فلات ایران در گروه ناحیه زمین‌ساختی فعال و همراه با زمین‌لرزه‌های کم‌عمق روی داده در پوسته تقسیم‌بندی می‌شود. در قرن ۲۰ و ۲۱، بیش از ۱۳۰ زمین‌لرزه بزرگ رخ‌داده که موجب خسارات اقتصادی و اجتماعی گسترده و تلفات انسانی شده است. این شرایط، آسیب‌پذیری بالای کشور را در برابر زلزله نشان داده و اهمیت توجه به ایمنی لرزه‌ای، به‌ویژه در زیرساخت‌های حیاتی، را برجسته کرده است. لازمه بررسی لرزه‌خیزی هر منطقه، ایجاد کاتالوگ لرزه‌ای کامل و همگن بوده که در مطالعه حاضر فهرست زمین‌لرزه‌ها در گستره شعاعی ۲۰۰ کیلومتری پیرامون طرح، در دسته‌های زمین‌لرزه‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰) و دستگاهی (پس از ۱۹۰۰) طبقه‌بندی شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مطابق با کاتالوگ تهیه شده زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بین چهار تا پنج ریشتری سهم عمده‌ای را به خود اختصاص داده است.

زمین‌لرزه‌های تاریخی

زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران توسط پژوهشگران بررسی شده‌اند، یکی از معتبرترین اطلاعات را آمبرسیز و ملویل (Ambraseys and Melville, 1982) ارائه کردند. آن‌ها بزرگی و موقعیت زمین‌لرزه‌ها را با تحلیل مدارک تاریخی و مطالعات صحرایی تخمین زدند. بدین سبب تعداد ۹ زمین‌لرزه تاریخی واقع در شعاع ۲۰۰ کیلومتری پیرامون طرح گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، زمین‌لرزه‌های تاریخی مهمی در منطقه موردمطالعه رخ‌داده است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به زلزله ۱۷۰۳ با بزرگای ۶/۸ ریشتری اشاره کرد.



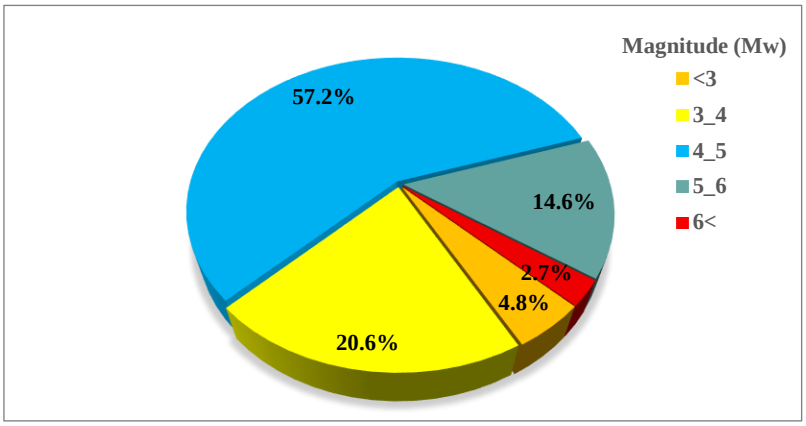
شکل ۳. گسل‌های اصلی و کانون سطحی زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی رخ‌داده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری گستره طرح

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

Fig. 3. The main faults and surface epicenter of historical and instrumental earthquakes that occurred within a radius of 200 kilometers of the project area

زمین‌لرزه‌های دستگاهی

در شکل ۳ موقعیت کانون سطحی زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت شده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری منطقه نمایش داده شده است. همان‌گونه که در نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مشاهده می‌شود، پراکندگی زمین‌لرزه‌ها تقریباً مطابق با ساختارهای زمین‌ساختی نظیر گسل‌ها گستره است. همچنین با توجه به شکل ۵-الف و بر اساس داده‌های لرزه‌ای از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۲، ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۶/۵ ریشتر در محدوده مطالعاتی ثبت شده است. به طور میانگین، هر ۳ سال یک زلزله مخرب در این منطقه رخ می‌دهد.



شکل ۴. فراوانی زمین‌لرزه‌ها در بازه‌های مختلف بزرگا در پیرامون ساختگاه (بازه زمانی ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۲)

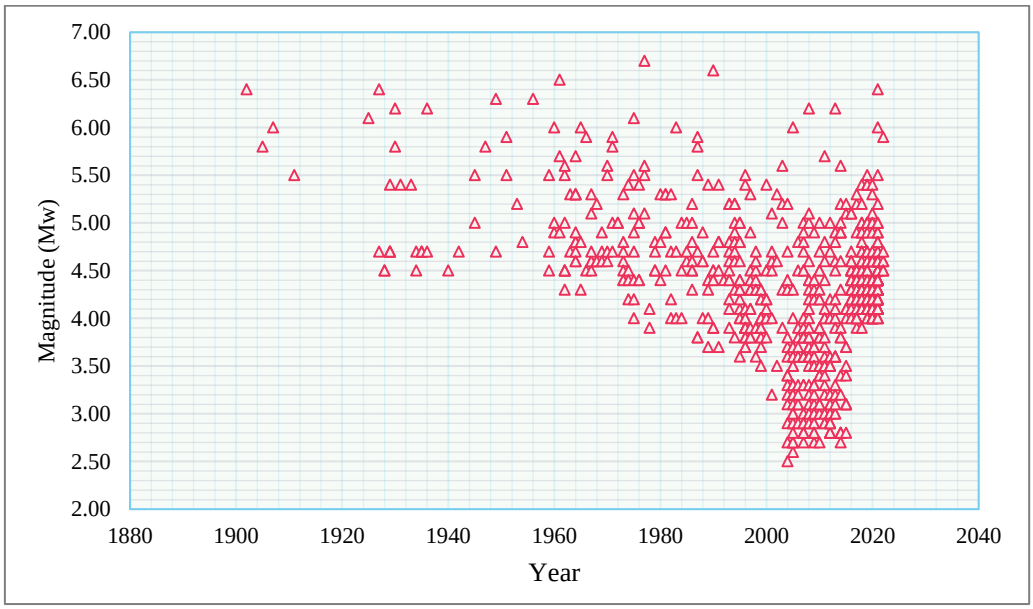
Fig. 4. Frequency of earthquakes at different magnitude intervals around the site (time period from 1900 to 2022)

عمق زلزله‌ها

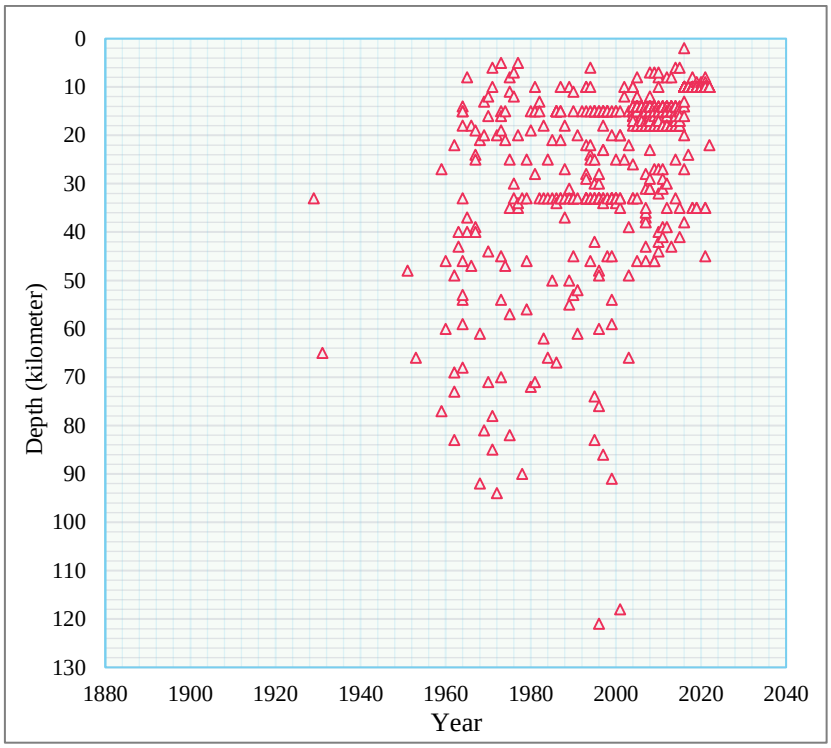
زلزله‌های ایران عمدتاً منشأ پوسته‌ای دارند (Berberian, 1995). تعیین عمق کانونی زلزله‌ها که توسط مؤسسات زلزله‌نگاری گزارش می‌شود، معمولاً با خطا همراه است. بر اساس داده‌های ثبت‌شده، بیشترین عمق کانونی زلزله در منطقه موردمطالعه ۱۲۰/۸ کیلومتر و کمترین آن ۱/۳ کیلومتر گزارش شده است (شکل ۵-ب). با توجه به خطاهای اندازه‌گیری و ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران، میانگین عمق کانونی زلزله‌ها در این منطقه کمتر از ۲۵ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، شواهدی برای لرزه‌خیزی در اعماق بیش از ۴۰ کیلومتر وجود ندارد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]



(a)



(b)

شکل ۵. a) فراوانی زلزله‌ها، b) توزیع عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها نسبت به زمان

Fig. 5. a) Earthquake frequency, b) The distribution of the hypocentral depths of earthquakes over time

حذف پیشامدهای وابسته در کاتالوگ

برای حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها در تحلیل لرزه‌خیزی، فرض بر این است که زمین‌لرزه‌ها به طور تصادفی رخ

می‌دهند و زمان وقوع زلزله بعدی مستقل از زلزله قبلی است. مدل‌های مختلفی برای حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها مدل‌های گاردنر و نوپوف (Gardner and Knopoff, 1974)، کیلیس و همکاران (Keilis et al., 1980) و ریزنبرگ (Reasenberg, 1985) هستند. در این پژوهش، حذف این رویدادها با استفاده از نرم‌افزار Knopoff انجام شده است.

عدم قطعیت‌ها در بزرگا و مختصات مکانی

عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های تاریخی نقش مهمی در تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی دارد. عدم قطعیت در بزرگای ثبت شده بسته به نوع داده متفاوت است: برای داده‌های تاریخی، این مقدار تا ۰/۵ واحد بزرگا، برای داده‌های دستگاهی قبل از ۱۹۶۴ میلادی برابر ۰/۳ و برای داده‌های دستگاهی پس از ۱۹۶۴ میلادی برابر ۰/۱ واحد بزرگا در نظر گرفته شده است.

تقسیم‌بندی سایزموتکنیکی گسترهٔ موردمطالعه

بر اساس ویژگی‌های لرزه‌خیزی و زمین‌ساختی تقسیم‌بندی سایزموتکنیکی گستره موردمطالعه انجام شده است. مناطقی که روند لرزه‌خیزی، عمق کانونی زلزله‌ها و سازوکار لرزه‌ای آن‌ها همگن باشد، به‌عنوان ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی تفکیک می‌شوند. در بررسی استان‌های لرزه‌زمین‌ساخت ایران، با وجود تفاوت‌های ظاهری در تقسیم‌بندی‌ها، اطلاعات پایه زمین‌ساختی آن‌ها یکسان است. توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 1999) ایران را از دیدگاه زمین‌ساختی به ۷ واحد اصلی و ۲۰ واحد فرعی لرزه‌زمین‌ساختی تقسیم کرده‌اند. گستره موردمطالعه در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی شماره ۱۲ (کمربند زاگرس چین‌خورده) قرار دارد. پارامترهای لرزه‌خیزی ایالت مذکور به ترتیب با روش کیکو - سلوول و گوتنبرگ - ریشتر برابر است با (Beta= ۲/۱۲ و b= ۰/۹۰) و (Beta= ۱/۹۸ و b= ۰/۸۶) همچنین بیشترین بزرگای محتمل در گستره موردمطالعه ۷/۲ و بزرگ‌ترین زمین‌لرزه مشاهده شده در منطقه ۷/۰ بوده و آهنگ فعالیت با نرخ متوسط وقوع λ در هر سال با بزرگی Ms> ۴/۵ برابر با ۱/۷۰ است، یعنی به طور متوسط هر ۳ سال، ۵ زلزله با بزرگی بیشتر از ۴/۵ در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی مذکور روی می‌دهد.

نتایج و بحث

تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی

پارامترهای لرزه‌خیزی بیان‌کننده سیمای لرزه‌خیزی یک گستره هستند و بر اساس آن‌ها احتمال رویداد و دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگای مختلف برآورد می‌شود. ازاین‌رو برای به دست آوردن پارامترهای لرزه‌خیزی می‌توان از روش‌های مختلف آماری استفاده نمود. در این مطالعه از روش گوتنبرگ - ریشتر (Gutenberg and Richter, 1956) استفاده شده است تا با استفاده از نتایج حاصل، مناسب‌ترین پارامترهای لرزه‌خیزی در رابطه با فعالیت چشمه‌های لرزه‌زا انتخاب گردد. مطابق رابطه ۱ فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها (Nc) به طور خطی و با در نظر گرفتن رابطه ساده زیر به بزرگا (M) نسبت داده می‌شود:

$$\text{Log } N_C = a - (b \times M) \qquad (۱)$$

رابطه مقدماتی گوتنبرگ - ریشتر بر حسب لگاریتم طبیعی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Ln } N_C = \text{Ln}N_0 - (\beta \times M) \qquad (۲)$$

با مقایسه این دو رابطه تساوی زیر بین ضرایب آن‌ها برقرار خواهد گردید:

$$\text{Ln } N_0 = a \qquad (۳)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

$$\beta = 2.303 \times b \qquad (۴)$$

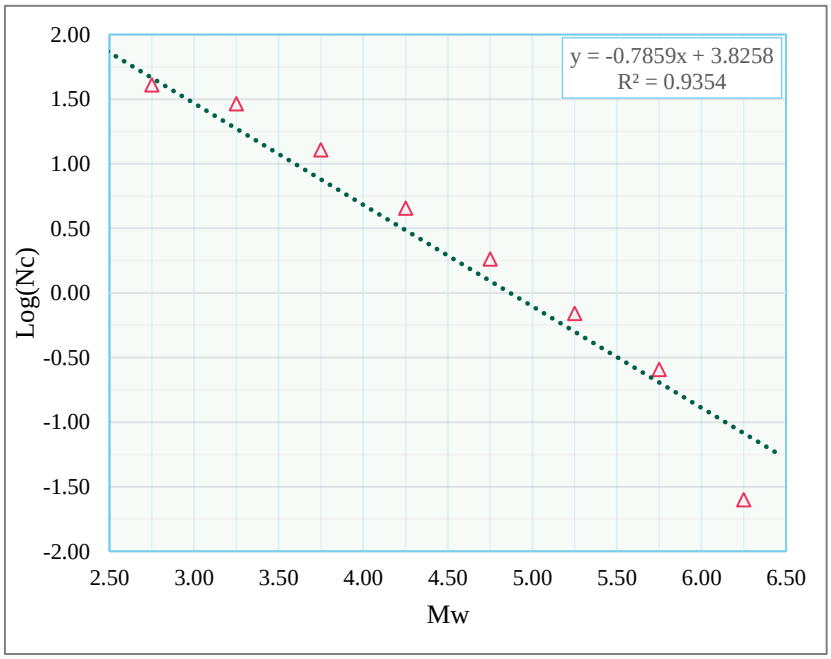
پارامترهای N_0 و a معرف آهنگ رویداد سالیانه و β و b ضریب لرزه‌خیزی گستره موردنظر هستند. بر اساس زمین‌لرزه‌های مورد اشاره و با تبعیت از مستقل بودن رویداد زمین‌لرزه‌ها در حوزه زمان و مکان (پواسونی شده) در شکل ۶ نمودار رابطه بین فراوانی و بزرگای گشتاوری برای محدوده موردمطالعه رسم گردید. رابطه خطی ناشی از برازش بین لگاریتم فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها و بزرگا در رابطه ۵ نمایش داده شده است.

$$\mathrm{LogNC/T} = 3.8258 - 0.7859M \qquad (۵)$$

با استفاده از رابطه حاصل از نمودار گوتنبرگ - ریشتر در گستره موردمطالعه و در زمان جمع‌آوری داده‌ها به ازای دوره‌های بازگشت مختلف، حداکثر بزرگی زلزله‌های قابل‌انتظار در شعاع ۲۰۰ کیلومتری بندر محاسبه گردید که نتایج آن به شرح جدول ۲ است. چنان‌که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۷/۵ قریب به ۱۱۷ سال و زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۵ ریشتر دارای دوره بازگشتی حدود ۱/۲۷ سال است.

توان لرزه‌زایی گسل‌ها

توان لرزه‌زایی هر یک از گسل‌ها با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در جدول ۳ که بزرگا را با طول گسیختگی هر گسل هم‌بسته می‌سازد محاسبه شده و یا در صورت وقوع رویداد واقعی لرزه‌ای منتسب با آن گسل بزرگای آن زمین‌لرزه در صورت بزرگ‌تر بودن از مقادیر محاسبه شده در نظر گرفته شده و توان لرزه‌زایی حاصل از گسل‌های مهم گستره طرح در جدول ۴ به نمایش درآمده است.



شکل ۶. رابطه خطی بین نرخ لرزه‌خیزی و بزرگا بر اساس روش گوتنبرگ - ریشتر

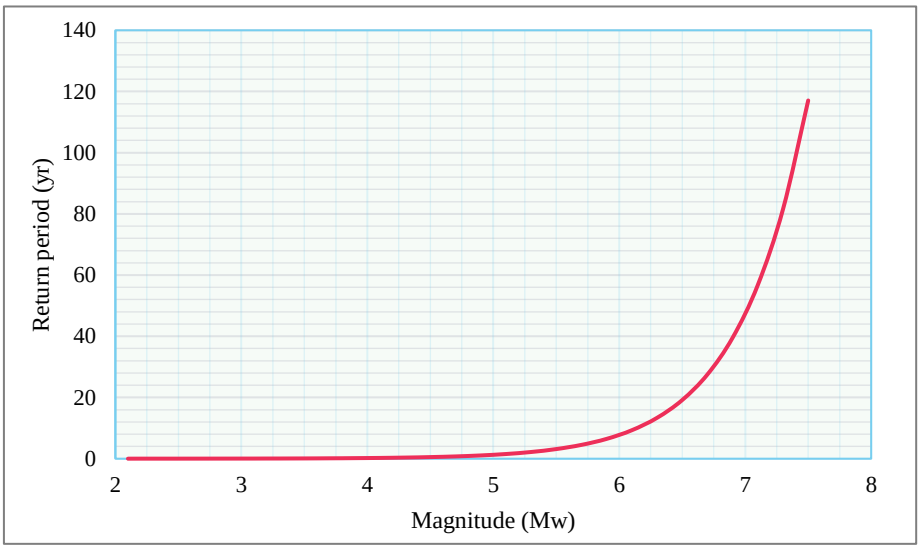
Fig. 6. Linear relationship between seismicity rate and magnitude based on Gutenberg-Richter method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

جدول ۲. دوره بازگشت به ازای بزرگا در محدوده مطالعاتی

Table 2. Return period of earthquakes in terms of moment magnitude in the study area

Return Period (yr)	0.01	0.03	0.08	0.21	0.51	1.27	3.14	7.76	19.17	47.37	117.07
Magnitude (M_w)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5



شکل ۷. نمودار دوره‌های بازگشت مختلف و حداکثر بزرگی زلزله‌های قابل‌انتظار

Fig. 7. Chart of different return periods and the maximum expected earthquake magnitudes

جدول ۳. روابط تجربی برآورد بزرگا بر اساس طول گسل

Table 3. Empirical relationships of magnitude estimation based on fault length

No.	**Relationship**	**Fault Type**	**Reference**
1	M_S= 4.629+ 1.429 Log (L)	All Faults	Ambraseys and Melville (1982)
2	M_S= 1.259+ 1.244 Log (L)		Nowroozi (1985)
3	M_S= 5.08 + 1.16 Log (L)		Wells and Coppersmith (1994)
4	M_S =5.27+ 1.04 Log (L)		Ambraseys and Jackson (1998)
5	M_S= 3.66+ 0.9 Ln (L)		Zare (1999)

شناسایی و مدل نمودن چشمه‌های لرزه‌زا

شناسایی و مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌زا نخستین گام در تحلیل خطر زمین‌لرزه است و هدف آن تعیین مناطقی با فعالیت لرزه‌ای یکنواخت است. این مناطق به‌صورت چشمه‌های لرزه‌ای نقطه‌ای، خطی، سطحی و حجمی مدل می‌شوند. لازم به ذکر است انتخاب چشمه‌ها در گستره موردمطالعه بر اساس تمرکز رومرکز زلزله‌های رخداده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

(تاریخی و دستگاهی)، ساختارهای زمین‌شناسی موجود از جمله امتداد گسل‌های منطقه و همچنین ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی است (شکل ۸). در جدول ۵ مشخصات چشمه‌های لرزه‌ای گستره موردمطالعه آورده شده است.

جدول ۴. توان لرزه‌زایی (بزرگی زلزله) گسل‌های گستره موردمطالعه

Table 4. Seismicity (earthquake magnitude) of faults in the study area

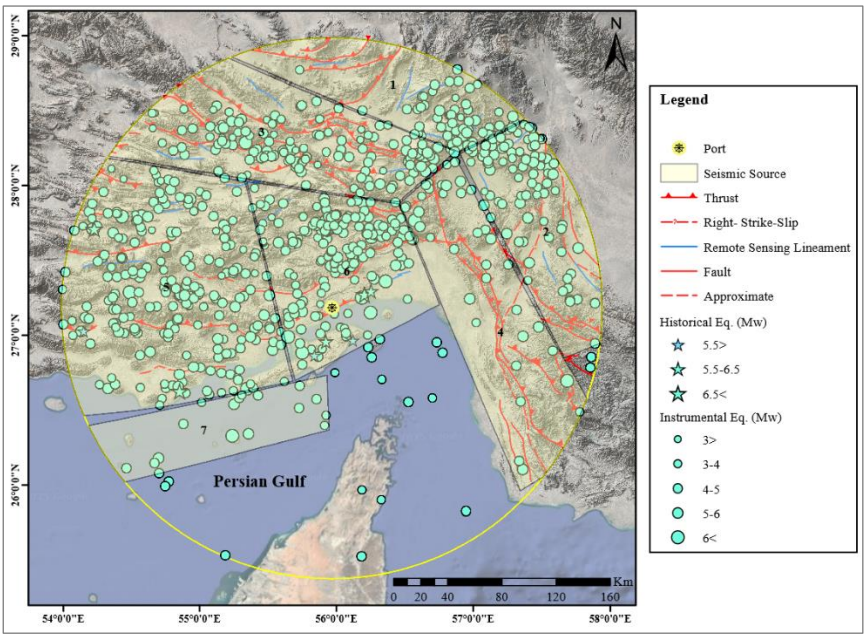
No.	Fault Name	length (km)	Ambraseys and Melville (1982)	Nowroozi (1985)	Wells and Coppersmith (1994)	Ambraseys and Jackson (1998)	Zare (1999)	Mean
1	M.F.F.	105	7.3	7.0	6.8	7.3	7.1	7.1
2	H.Z.F.	115						
3	Faraghoun	92	7.2	6.9	6.7	7.2	6.9	7.0
4	Gahkom	97						
5	M.Z.R.F.	250	7.5	7.5	7.3	7.7	7.8	7.5
6	Dar Bagh	44	7.0	6.5	6.2	6.8	6.2	6.6
7	Palami	22	6.9	6.1	5.8	6.5	5.6	6.2
8	Minab	200	7.4	7.3	7.2	7.6	7.6	7.4
9	Deraz	40	7.0	6.5	6.1	6.8	6.1	6.5
10	Darpahn	58	7.1	6.7	6.4	7.0	6.4	6.7
11	Beshnow	25	6.9	6.2	5.8	6.6	5.7	6.2
12	Dargan	44	7.0	6.5	6.2	6.8	6.2	6.6
13	Ashkan	22	6.9	6.1	5.8	6.5	5.6	6.2
14	Pashgiram	153	7.4	7.2	7.0	7.5	7.3	7.3
15	Rudan	48	7.1	6.6	6.3	6.9	6.3	6.6
16	Sabzevaran	170	7.4	7.2	7.1	7.5	7.4	7.3
17	Jiroft	130	7.3	7.1	6.9	7.4	7.2	7.2
18	Bakhtegan	25	6.9	6.2	5.8	6.6	5.7	6.2
19	Band Kalani	78	7.2	6.8	6.6	7.1	6.7	6.9

برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالاتی

روش احتمالاتی با در نظر گرفتن داده‌های زمین‌شناسی، مدل‌های لرزه‌زمین‌ساختی، چشمه‌های لرزه‌زا و روابط کاهندگی، بیشینه جنبش زمین را برای دوره‌های زمانی مختلف و درصدهای خطرپذیری متفاوت برآورد می‌کند. این روش تمامی زمین‌لرزه‌ها و چشمه‌های مهم را با احتمال وقوع آن‌ها در تحلیل لحاظ می‌کند. در این پژوهش، محاسبات تحلیل خطر لرزه‌ای به روش احتمالاتی با استفاده از نرم‌افزار Ez-Frisk انجام شده است. برآورد پارامترهای جنبش زمین (شتاب) برای دوره‌های بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال و عمر مفید ۵۰ سال بر اساس پارامترهای لرزه‌خیزی استخراج‌شده از روش گوتنبرگ - ریشتر و با بهره‌گیری از روابط کاهندگی مناسب صورت گرفته است. انتخاب مدل مناسب از میان مدل‌های مختلف کاهندگی جنبش نیرومند زمین با توجه به معیارهایی ازجمله فاصله از چشمه‌های لرزه‌زا، بزرگای زمین‌لرزه، ژرفای کانونی، شرایط زمین‌شناسی منطقه، سازوکار لرزه‌ای چشمه‌ها و میزان خطای استاندارد انجام شده است. به طور مثال رابطه کمپل و بزرگ‌نیا (Campbell and Bozorgnia, 2003; 2008) به دلیل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

مشابهت شرایط زمین‌شناسی و لرزه زمین‌شناسی داده‌های مورداستفاده در توسعه آن با شرایط ایران و همچنین در نظر گرفتن اثرات حوزه نزدیک (Near-Source Effects) انتخاب گردیده است. برای برآورد حداکثر شتاب افقی، روابط کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (Abrahamson and Silva, 2008) با وزن ۱۵٪، بور و اتکینسون (Boore and Atkinson, 2008) با وزن ۳۰٪، کمپل و بزرگ‌نیا (Campbell and Bozorgnia, 2008) با وزن ۳۵٪ و آمبرسیز و همکاران (Ambraseys et al., 2005a) با وزن ۲۰٪ استفاده شده است. همچنین برای برآورد حداکثر شتاب قائم، روابط آبراهامسون و سیلوا (Abrahamson and Silva, 1997) با وزن ۲۵٪، کمپل و بزرگ‌نیا (Campbell and Bozorgnia, 2003) با وزن ۴۰٪ و آمبرسیز و همکاران (Ambraseys et al., 2005b) با وزن ۳۵٪ به‌کاررفته است.



شکل ۸. چشمه‌های لرزه‌ای تعیین شده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری بندر شهید رجایی

Fig. 8. Seismic sources identified within a 200 kilometer radius of Shahid Rajaei Port

جدول ۵. مشخصات چشمه‌های لرزه‌ای در شعاع ۲۰۰ کیلومتری از بندر شهید رجایی

Table 5. Specifications of the seismic sources

Source Name	Source Area (km^2)	Max. Occurred Magnitude	Max. Selected Magnitude	Parameter b	Parameter β	Parameter a	Parameter α
1	13151	6.5	6.5	1.14	2.62	6.93	15.95
2	10541	5.7	7.2	1.15	2.64	7.12	16.39
3	21509	6.1	7.5	0.90	2.07	6.12	14.09
4	14763		7.4	0.71	1.63	4.86	11.19
5	28075	6.3	7.1	0.93	2.14	6.40	14.73
6	12683	6.4		0.80	1.84	5.96	13.10
7	8143	6.1	6.1	0.61	1.40	3.92	9.02

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

در محاسبات نهایی، روش درخت منطقی برای وزن‌دهی به مدل‌های مختلف در نظر گرفته شده است تا کاستی‌های موجود در داده‌های زمین‌لرزه‌های ایران و ارائه مقادیر محافظه‌کارانه برای فواصل زیاد تعدیل شود. در جدول ۶ مقادیر شتاب افقی و قائم به‌دست‌آمده از تحلیل خطر احتمالاتی برای دوره‌های بازگشت مختلف ارائه شده است.

جدول ۶. برآورد بیشینه شتاب افقی و قائم به‌دست‌آمده به روش احتمالاتی

Table 6. Estimation of maximum horizontal and vertical accelerations by probabilistic method

Return Period (year)					
75		475		2475	
Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
0.185	0.125	0.385	0.290	0.670	0.515

تهیه طیف پاسخ تجربی و نقشه‌های هم‌شتاب

در این مطالعه طیف پاسخ ساختگاه بر اساس شتاب نگاشت‌های زمین‌لرزه طبس، در چهار ایستگاه بجستان، بشرویه، فردوس و کاشمر محاسبه شده است. با توجه به حفاری‌های ژئوتکنیکی ساختگاه گستره موردمطالعه بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ (Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2015) در رده ۳ قرار می‌گیرد. همچنین به علت شرایط زمین‌ساختی، عمق کانونی اغلب زمین‌لرزه‌های رخداده کمتر از ۲۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. در همین راستا برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال و عمر مفید ۵۰ سال میانگین طیف پاسخ افقی و قائم نرمال شده شتاب نگاشت‌های انتخاب شده برای میرایی ۵٪ در شکل ۹ ارائه شده است. به‌منظور تهیه نقشه‌های هم‌شتاب گستره موردمطالعه به فواصل ۱/۰ درجه در جهت طولی و عرضی جغرافیایی شبکه‌بندی گردید و برای هر کدام از شبکه‌های ایجاد شده تحلیل خطر انجام پذیرفت. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نقشه بیشینه شتاب افقی و قائم میانگین برای دوره‌های ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال ترسیم شده است. مقدار بیشینه شتاب شمال شرق محدوده نسبت به سایر مناطق بالاتر است که علت آن عبور گسل لبه گودال زاگرس از این منطقه است.

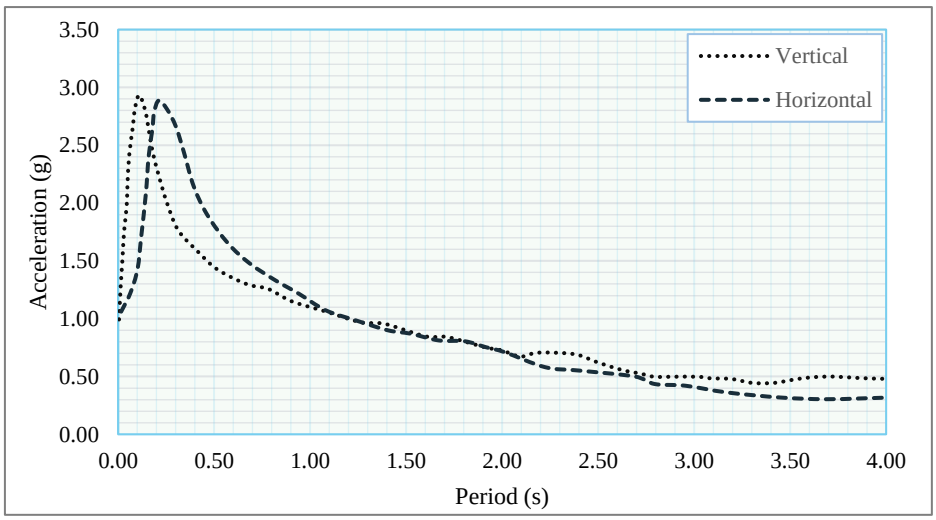
نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل جامع خطر لرزه‌ای احتمالاتی (PSHA) برای بندر شهید رجایی ارائه شده است؛ با توجه به نقش حیاتی این بندر به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های کلیدی در پایداری اقتصادی کشور و ارتباط آن با شبکه‌های تجارت جهانی. این تحلیل با دقت بالا و بهره‌گیری از مجموعه‌ای گسترده از داده‌ها انجام شده است که شامل سوابق تاریخی و دستگاهی زمین‌لرزه‌ها، مشخصات دقیق گسل‌های منطقه‌ای می‌باشد. طبق مطالعات صورت گرفته بیشینه شتاب افقی و قائم زلزله مبنای طرح (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) به ترتیب (g) ۰/۳۸۵ و ۰/۲۹۰ بوده که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم مجموعه‌ای از گسل‌های فعال بر لرزه‌خیزی منطقه است. از سوی دیگر بر اساس نقشه لرزه‌زمین‌ساخت ترسیم شده پراکندگی زمین‌لرزه‌ها تقریباً مطابق با ساختارهای زمین‌ساختی (گسل‌ها) گستره است. این گسل‌ها، از جمله گسل لبه گودال زاگرس، گسل لبه کوهستان، گسل راندگی اصلی، گسل میناب، گسل پاشگیرام، گسل سبزواران و سایر ساختارهای زمین‌شناسی، نقش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

بسزایی در رخدادهای لرزه‌ای و رفتار زمین‌شناختی منطقه ایفا می‌کنند. این مجموعه گسل‌های فعال در کنار عوامل دیگر همچون ویژگی‌های زمین‌شناسی محلی و تغییرات لرزه‌ای منطقه، تأثیر مستقیمی بر میزان آسیب‌پذیری سازه‌های موجود دارند. یافته‌های حاصل از این تحلیل، سطح قابل‌توجه و نگران‌کننده‌ای از خطر لرزه‌ای در بندر شهید رجایی را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که حرکات احتمالی زمین در این منطقه، به‌ویژه در بخش شمال شرقی تأسیسات بندری، از سطوح خطر تعیین‌شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران فراتر می‌روند. بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰، ایران به چهار پهنه خطر زلزله شامل بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم تقسیم شده است. در ویرایش سال ۱۳۹۳ این آیین‌نامه، نقشه پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه ارائه شده است که محل موردمطالعه در پهنه خطر نسبی زیاد قرار دارد؛ بنابراین شتاب مبنای طرح آن حدود (g) ۰/۳۰ در نظر گرفته می‌شود. اما پژوهش حاضر بیان می‌کند که این محدوده از خطر لرزه‌ای بالاتری نسبت به مقدار استاندارد در آیین‌نامه ایران برخوردار است به‌نحوی‌که در پهنه خطر نسبی خیلی زیاد جای می‌گیرد. دلیل این تفاوت می‌تواند ناشی از شناسایی دقیق گسل و چشمه‌های لرزه‌زا، به‌روزرسانی داده‌های لرزه‌ای و استفاده از روابط کاهندگی مناسب در تحلیل خطر احتمالاتی باشد. مقادیر محاسبه‌شده برای بیشینه شتاب زمین (PGA) شتاب‌های طیفی و طیف‌های خطر یکنواخت، مبنایی علمی و قابل‌اعتماد برای ارزیابی ریسک و تدوین برنامه‌های کاهش خطر فراهم می‌سازند.

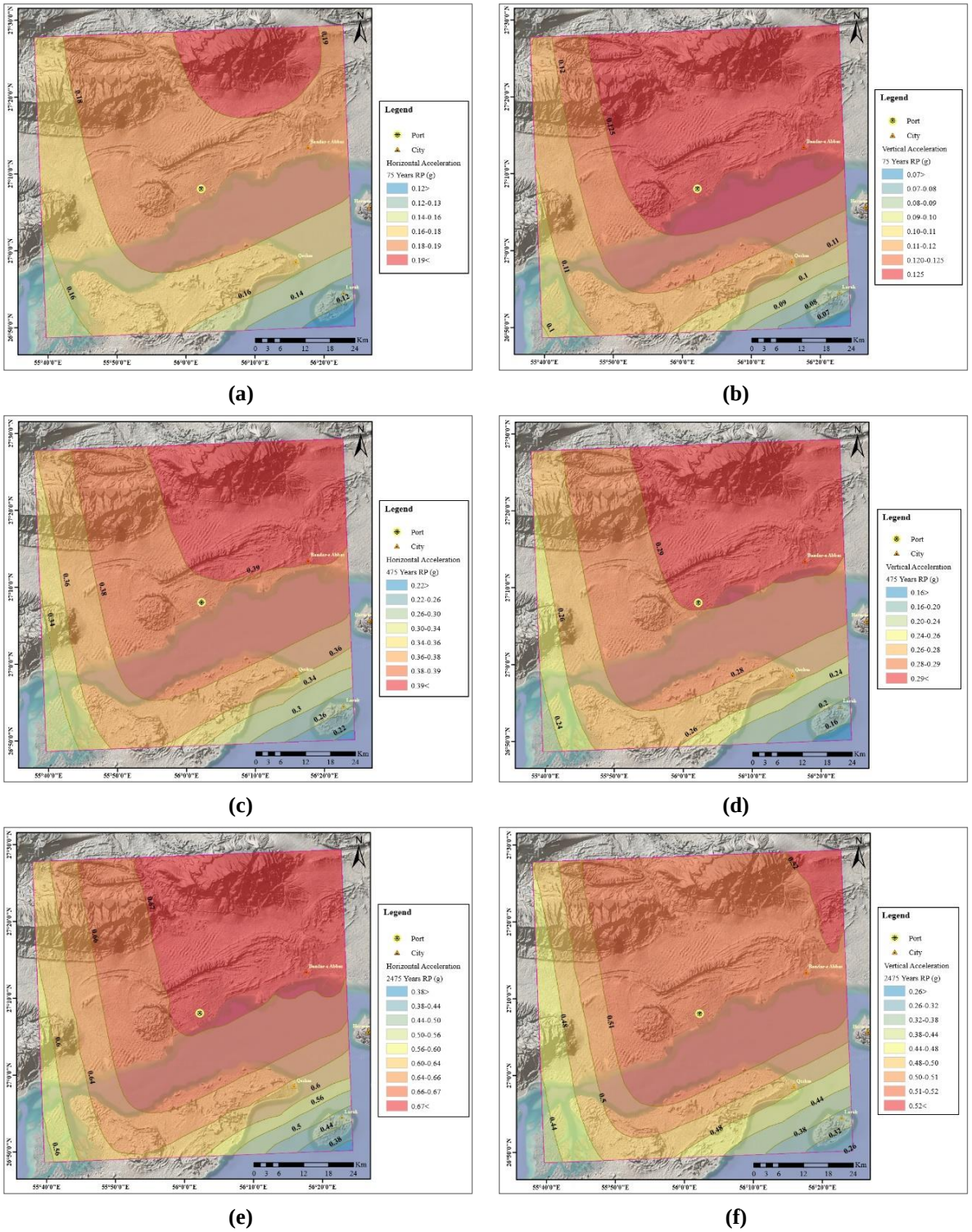


شکل ۹. میانگین طیف پاسخ افقی و قائم نرمال شده شتاب‌نگاشت‌های منتخب به ازای میرایی ۵٪

Fig. 9. Normalized mean response spectrum of the selected accelerograpghs in the horizontal and vertical directions for a 5% damping

منطقه موردمطالعه از حیث لرزه‌خیزی به واسطه حضور گسل‌های طویل با سازوکار اغلب راندگی به‌شدت فعال بوده که شاهد آن زلزله‌های متعددی است که در این ناحیه روی داده است. بر اساس محاسبات انجام شده، گسل‌های منطقه در صورت فعالیت توانایی تولید زمین‌لرزه‌های با بزرگا ۶/۵ را دارند که با توجه به سابقه لرزه‌خیزی منطقه در دوره بازگشت معین دور از انتظار نیست؛ اما وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بیشتر از احتمال کمی برخوردار است. وقوع چنین زمین زلزله‌هایی در صورت گسیختگی در راستای گسل‌های راندگی اصلی، میناب و پاشگیرام محتمل است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]



شکل ۱۰. منحنی‌های هم‌شتاب میانگین برای دوره بازگشت؛ a) ۷۵ سال افقی، b) ۷۵ سال قائم، c) ۴۷۵ سال افقی، d) ۴۷۵ سال قائم، e) ۲۴۷۵ سال افقی، f) ۲۴۷۵ سال قائم

Fig. 10. The mean isoacceleration curves for the return period; a) 75-year horizontal, b) 75-year vertical, c) 475-year horizontal, d) 475-year vertical, e) 2475-year horizontal, f) 2475-year vertical

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

ویژگی زمین‌لرزه‌های به وقوع پیوسته در گستره طرح حاکی از زلزله‌هایی با بزرگای متوسط با دوره بازگشت کوتاه‌مدت با عمق کمتر از ۲۵ کیلومتر هستند که زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بین ۴ تا ۵ ریشتر سهم عمده‌ای در این میان دارند. نتایج این مطالعه بر ضرورت گذار از طراحی مبتنی بر آیین‌نامه‌های تجویزی به‌سوی رویکردهای مبتنی بر ریسک در توسعه و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های آتی بندر شهید رجایی تأکید دارند. اتخاذ چنین رویکردی برای طراحی بهینه سازه‌های جدید، از جمله اسکله‌ها، جرثقیل‌های کانتینری، انبارها و سامانه‌های حیاتی، امری ضروری است و می‌تواند خسارات ناشی از زمین‌لرزه را که منجر به اختلال جدی در عملکرد بندر می‌شوند، به حداقل برساند. پیامدهای این رویکرد فراتر از حفظ یکپارچگی سازه‌ای بوده و مستلزم بررسی دقیق تعامل خاک و سازه، پتانسیل روان‌گرایی و آسیب‌پذیری تأسیسات مدفون است. اجرای معیارهای طراحی مبتنی بر عملکرد، با توجه به سطوح خطر شناسایی‌شده در این پژوهش، تضمین‌کننده تداوم عملکرد بندر پس از رخدادهای لرزه‌ای، تسریع در روند بازیابی و کاهش زیان‌های اقتصادی خواهد بود. یافته‌های این پژوهش صرفاً جنبه علمی ندارند، بلکه نقش حیاتی در ارتقای تاب‌آوری بلندمدت و پایداری بندر شهید رجایی ایفا می‌کنند. این نتایج به طور مستقیم در اولویت‌بندی مناطق و اجزای زیرساختی آسیب‌پذیر جهت مقاوم‌سازی، تدوین برنامه‌های جامع واکنش اضطراری، و طراحی راهبردهای مؤثر برای تداوم کسب‌وکار تأثیرگذار هستند. با وجود ارائه ارزیابی جامع از خطر لرزه‌ای، انجام تحقیقات تکمیلی به‌منظور بررسی اثرات تقویت موضعی خاک از طریق مطالعات ژئوتکنیکی دقیق و ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای توصیه می‌شود. همچنین، توسعه منحنی‌های شکنندگی متناسب با انواع زیرساخت‌های موجود در بندر، برای بهبود ارزیابی ریسک و طراحی اقدامات هدفمند کاهش خطر، ضروری است. در نهایت، این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر فعالیت‌های لرزه‌ای در منطقه و به‌روزرسانی مداوم ارزیابی‌های خطر با بهره‌گیری از داده‌های جدید تأکید دارد. اجرای توصیه‌های ارائه‌شده در این پژوهش، امکان اتخاذ تصمیم‌های پیشگیرانه را برای حفاظت از رفاه اقتصادی و اجتماعی منطقه فراهم می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که مسیرهای حیاتی تجارت به‌طور ایمن باقی بمانند، اختلالات احتمالی در زنجیره تأمین جهانی به حداقل برسند و توانمندی بندر در مقابله با رخدادهای لرزه ای آینده تقویت شود.

قدردانی

نویسندگان از مساعدت و همکاری ارزشمند سازمان بنادر و دریانوردی در طول نگارش این مقاله قدردانی می‌کنند.

References

Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. Seismological research letters, 68(1), 94-127.

Abrahamson, N., & Silva, W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. Earthquake spectra, 24(1), 67-97.

Afsari, N., Abdipour, M. S., & Taghizadeh-Farahmand, F. (2022). Seismic hazard analysis from deterministic method using fuzzy logic in Anzali Port. Earth Science Informatics, 15(1), 563-572.

Alizadeh, A. , Safari, R. and Golestani, S. (2023). Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) of the Ardabil city using Ez-Frisk. Researches in Earth Sciences, 14(1), 1-17. (In Persian)

Ambraseys, N. N., & Melville, C. P. (1982), A History of Persian Earthquakes, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ambraseys, N. N., & Jackson, J. A. (1998). Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. Geophysical Journal International, 133(2), 390-406.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]

Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K., & Smit, P. M. (2005a). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. Bulletin of earthquake engineering, 3, 1-53.

Ambraseys, N.N. Douglas, J. Sarma, S.K. And Smit, P.M. (2005b). Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Vertical peak ground acceleration and spectral acceleration. Bulletin of Earthquake Engineering, 3, pp 55–73.

Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V., & Bellier, O. (2006). Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS measurements. Geophysical Journal International, 165(1), 373-381.

Berberian, M. (1995). Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, 241(3-4), 193-224.

Boore, D. M., & Atkinson, G. M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake spectra, 24(1), 99-138.

Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2003). Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(1), 314-331.

Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake spectra, 24(1), 139-171.

Davari Sarem, M., Roshan Liarajdameh, M., and Abbasi, M., (2022). Deterministic seismic hazard analysis and response design spectrum of Kazerun county, Fars province, The 2th International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art, Tabriz, Iran. https://civilica.com/doc/1613641

Eftekhari, N., Motaghed, S., Emadali, L., Sayyadpour, H. (2022). Ranking of ground motion prediction equation for use in the seismic hazard analysis of Ahvaz city using data envelopment analysis. Journal of Engineering Geology, 16(2), 99-124. (In Persian)

Falcon, N. L. (1967). The geology of the north-east margin of the Arabian basement shield. Advancement of Science, 24(1), 31-42.

Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. Bulletin of the seismological society of America, 64(5), 1363-1367.

Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). Bulletin of the seismological society of America, 46(2), 105-145.

Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Seimic Design Code for Buildings, Standard 2800, 4th Edition, (2015). Housing and Urban Development Research Center, 135pp. (In Persian)

Keilis, B., Knopoff, L., & Im, R. (1980). Bursts Of Aftershocks, Long-Term Precursors Of Strong Earthquakes. Nature, 283, 258-63.

Mohammadian, M. (2020). Risk-Targeted Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Siraf Port. Journal of Geography and Environmental Hazards, 9(2), 61-82. (In Persian)

Motaghed, S., Shamsizadeh, M., Eftekhari, N. (2024). Earthquake possibility space of Ahvaz city based on intuitionistic fuzzy theory. Journal of Engineering Geology, 18(3), 320-340. (In Persian)

Nowroozi, A. A. (1985). Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(5), 1327-1338.

Parvizi, F., Shoaei, Gh., (2017). Probabilistic earthquake hazard and seismicity analysis of Bandar Abbas city, The 1st International Conference on Research and Advance in Geosciences, Shiraz, Iran. https://civilica.com/doc/668698 (In Persian)

Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7), 5479-5495.

Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Abbassi, M. R., Mercier, J., Shabanian, E., & Soleymani, S. (2004). Accommodation of Arabia-Eurasia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: A transition between collision and subduction through a young deforming system. Tectonics, 23(4).

Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Bourles, D., Bonnet, S., Abbassi, M. R., & Feghhi, K. (2005). Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros—Makran transfer zone: role of the Minab—Zendan fault system in accommodating Arabia—Eurasia convergence in southeast Iran. Geophysical Journal International, 162(1), 177-203.

Sadeghi, A. , Ghobishawi, Y. and Aboutorabi Boarzabadi, A. (2024). Evaluation and Zoning of Earthquake Hazard Using Fuzzy Hierarchical Analysis Approach(FAHP) (Case Study: Hormozgan Province). Quantitative Geomorphological Research, 13(3), 159-177. (In Persian)

Shukla, J., Choudhury, D. (2012). Seismic hazard and site-specific ground motion for typical ports of Gujarat. Natural hazards, 60, 541-565.

Sivandipour, A., Gerami, M., Taqdisi, H. (2012). Statistical prediction of probabilistic earthquake hazard zonation with artificial neural networks. Journal of Engineering Geology, 6(1), 1429-1444. (In Persian)

Tavakoli, B., Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Seismic hazard assessment of Iran. Annals of Geophysics, 42(6). https://doi.org/10.4401/ag-3781

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the seismological Society of America, 84(4), 974-1002.

Zare, M. (1999). Conribution a letude des mouvements forts en Iran: du Catalogue aux lois dattenuation, These de Doctorat (PhD Thesis), Universite Joseph Fourier, Gemoble, France.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.1.6]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1020361]