



Analysis of Earthquake Motion Parameters and Seismic Hazard Zonation in Sanandaj City Using Deterministic Methods and GIS

Shayda Sharifi¹, Hadi Nayyeri², Abdollah Nasiri³

¹. Department of Geomorphology, Nachral Resource Faculty, Kordestan University, Sanandaj, Iran.

Email: shaida.shrifi@uok.ac.ir

². (Corresponding Author) Department of Geomorphology, Nachral Resource Faculty, Kordestan University, Sanandaj, Iran.

Email: h.nayeri@uok.ac.ir

³. Department of Geomorphology, Nachral Resource Faculty, Kordestan University, Sanandaj, Iran

Email: ab.nosraty@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

23 April 2025

Received in revised form:

1 August 2025

Accepted:

13 September 2025

pp.1-23

Keywords:

Interpolation, Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV), Sanandaj, Seismic Hazard Zonation

ABSTRACT

Earthquakes are destructive natural hazards posing significant threats to urban communities, infrastructure, and sustainable development. This research aims to analyze ground motion parameters, specifically Peak Ground Acceleration (PGA) and Peak Ground Velocity (PGV), and to develop seismic hazard zonation maps for Sanandaj. Given Sanandaj's location in the Sanandaj-Sirjan structural zone and proximity to the seismically active Zagros belt, the city exhibits high seismic sensitivity. The study utilized Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) integrated with Geographic Information Systems (GIS). Seismic sources were identified as active faults exceeding 10 km in length within a 70 km radius. Earthquake magnitudes for these faults were estimated by averaging several empirical relationships based on fault length. The Chandra et al. model was applied to calculate intensity attenuation, which was subsequently converted to PGA and PGV parameters. Spline interpolation within GIS was employed to generate continuous hazard surfaces. The estimated PGA values ranged from 0.33g to 0.38g, and PGV values between 35 and 39 cm/s. These figures are slightly higher than the design base acceleration of 0.3g recommended by Iranian Standard 2800. The results reveal a heterogeneous distribution of seismic hazard in Sanandaj, with southwestern sectors experiencing the highest risk due to proximity to active faults. Consequently, the study underscores the necessity of incorporating local data into seismic assessments, revising seismic design regulations, and prioritizing retrofitting measures to enhance urban resilience.

Cite this article: Sharifi, S., nayyeri, H. and Nosrati, A. (2025). Analysis of Earthquake Ground Motion Parameters and Seismic Hazard Zonation in Sanandaj City Using Deterministic Methods and GIS. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(2).154-168.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.516193.1556](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.516193.1556)

Extended Abstract

Introduction Earthquakes constitute one of the most destructive natural hazards, posing serious threats to human societies, infrastructure, and the environment.

Specifically, in regions with high tectonic activity, understanding seismic behavior is crucial for disaster risk reduction.

The city of Sanandaj, as the center of Kurdistan Province and situated within the Sanandaj-Sirjan structural zone, is located near the seismically active Zagros belt. With a population exceeding 540,000 and vital infrastructure such as water distribution networks, the city's vulnerability to seismic events is significant.

Previous studies indicate that Peak Ground Velocity (PGV) correlates highly with pipeline breakage rates, while Peak Ground Acceleration (PGA) governs the damage to surface structures. However, the standard design code (Standard 2800) provides generalized values that may not reflect local tectonic specifics.

This study aims to analyze earthquake motion parameters (PGA and PGV) and generate seismic hazard zonation maps using a deterministic approach and Geographic Information Systems (GIS). The research addresses the need for local-scale assessments to complement national standards. The primary objectives are to determine the spatial distribution of PGA and PGV, identify high-risk zones, and compare deterministic results with the prescribed values of Standard 2800. Specifically, the study seeks to answer: 1) What is the spatial distribution of PGA and PGV in Sanandaj? 2) Which urban areas are most vulnerable? 3) How do deterministic results align with current regulations?

Methodology This research employs a descriptive-analytical approach utilizing Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) and Geographic Information Systems (GIS). Data were collected from authoritative sources including the Geological Survey of Iran (fault maps), the Seismology Center (earthquake catalogs 2000-2020), and Sanandaj Municipality (urban base maps).

Faults with lengths exceeding 10 km within a 70 km radius were identified as effective seismic sources (40 faults total). To estimate earthquake magnitude (M) in the absence of sufficient strong-motion data, empirical relations between fault length and magnitude were applied. Four empirical models (Wells & Coppersmith 1994; Nowroozi 1985; Mohajer-Ashjai & Nowroozi 1987; Melville 1981) were used, and their average values were adopted to minimize uncertainty. Intensity at the epicenter (I_0) was calculated using $I_0 = 1.3M_s + 0.09$.

Subsequently, the attenuation of intensity was modeled using the Chandra et al. (1979) relation ($IR = I_0 + 6.453 - 0.00121R - 4.960 \log(R + 20)$), chosen for its calibration with Iranian data. The study area (15x18 km) was gridded into 1x1 km cells. PGA and PGV were derived from intensity using logarithmic relations ($\log_{10}(PGA) = 0.33MMI - 1.2$ and $\log_{10}(PGV) = 0.31MMI - 0.7$).

To create continuous hazard maps, Spline interpolation was selected over Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging due to its lower Root Mean Square Error (RMSE = 0.0248), ensuring the most accurate spatial representation of seismic hazard.

Results and Discussion The findings demonstrate a heterogeneous distribution of seismic risk across Sanandaj, strongly correlated with proximity to active faults. The highest hazard levels were identified in the southwestern parts of the city, where PGA values range from 0.34g to 0.36g and PGV ranges from 35 to 39 cm/s, corresponding to a Modified Mercalli Intensity (MMI) of VIII. In contrast, northeastern areas show lower values, decreasing to intensity VII. This gradient confirms that distance from seismic sources is the controlling factor in risk distribution. The estimated PGA values slightly exceed the design base acceleration of 0.3g recommended by Iran's Standard 2800. This discrepancy is attributed to the inclusion of numerous local active faults and the use of specific empirical attenuation relations for Iran, unlike the generalized approach of the

national code. The results align with Panahi and Motesharrei (2013) (PGA ~ 0.34g) but are slightly higher than Yazdani and Khaji (2015) (PGA ~ 0.25g), likely because the current study incorporated 40 active faults compared to their limited five sources. The high PGV values in the southwest indicate a significant risk to underground utilities, corroborating the findings of O'Rourke and Liu (2012) regarding pipe fragility. The interpolation analysis further confirmed that

Conclusion This study successfully applied a deterministic approach and GIS to assess seismic hazard in Sanandaj. The spatial analysis revealed that southwestern urban zones are the most vulnerable, experiencing higher PGA and PGV values than previously estimated by general codes. The study highlights that national standards may underestimate risks in specific micro-zones like Sanandaj. Therefore, revising Standard 2800 to incorporate local data and detailed fault analyses is recommended to enhance urban safety. Urban planners should prioritize retrofitting infrastructure, particularly water networks, in the southwestern districts to enhance resilience against potential earthquakes. Future research should integrate probabilistic methods and site-specific soil properties to further refine these hazard estimate.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

the Spline method provides the most plausible continuous surface for hazard mapping compared to other geostatistical methods.

regarding pipe fragility. The interpolation analysis further confirmed that the Spline method provides the most plausible continuous surface for hazard mapping compared to other geostatistical methods.

تحلیل پارامترهای جنبشی زلزله و پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای در شهر سنندج با استفاده از

روش‌های تعیینی و GIS

شیدا شریفی^۱، هادی نیری^۲، عبدالله نصرتی^۳۱- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: shaida.shrifi@uok.ac.ir۲- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: h.nayeri@uok.ac.ir۳- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: ab.nosraty@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	زلزله به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی مخرب، تهدیدی جدی برای جوامع شهری، زیرساخت‌ها و پایداری توسعه به‌شمار می‌آید. این پژوهش با هدف تحلیل پارامترهای جنبشی زلزله شامل بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای در شهر سنندج انجام شد. شهر سنندج به دلیل قرارگیری در زون ساختاری سنندج-سیرجان و مجاورت با کمربند لرزه‌خیز زاگرس، از حساسیت لرزه‌ای بالایی برخوردار است. در این تحقیق از رویکرد تحلیل خطر لرزه‌ای قطعی (DSHA) به‌همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده گردید. چشمه‌های لرزه‌زا شامل گسل‌های فعال با طول بیش از ده کیلومتر در شعاع هفتاد کیلومتری شهر شناسایی شدند و بزرگی زلزله هر گسل با بهره‌گیری از چندین رابطه تجربی مبتنی بر طول گسل برآورد و میانگین‌گیری شد. کاهندگی شدت زلزله با استفاده از مدل چاندرا و همکاران محاسبه و شدت‌ها به پارامترهای PGA و PGV تبدیل گردید. به‌منظور تولید سطوح پیوسته خطر لرزه‌ای، روش درونیایی اسپلین در محیط GIS به‌کار گرفته شد. مقادیر PGA در بازه ۰/۳۳g تا ۰/۳۸g و مقادیر PGV بین ۳۵ تا ۳۹ سانتی‌متر بر ثانیه برآورد شد. این مقادیر اندکی بالاتر از شتاب مبنای پیشنهادی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران که مقدار آن ۰/۳g می‌باشد، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توزیع خطر لرزه‌ای در شهر سنندج ناهمگون بوده و بخش‌های جنوب‌غربی شهر به دلیل نزدیکی به گسل‌های فعال، بالاترین سطح خطر را دارا هستند. نتایج پژوهش بر ضرورت لحاظ‌کردن داده‌های محلی در ارزیابی خطر لرزه‌ای و بازنگری در ضوابط طراحی لرزه‌ای و اولویت‌بخشی مقاوم‌سازی، توصیه می‌گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲	
صص. ۲۳-۱	
واژگان کلیدی: بیشینه شتاب زمین، بیشینه سرعت زمین، درونیایی، پهنه بندی خطر زلزله، سنندج	

استناد: شریفی، شیدا، نیری، هادی و نصرتی، عبدالله. (۱۴۰۴). تحلیل پارامترهای جنبشی زلزله و پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای در شهر سنندج با استفاده از روش‌های تعیینی و GIS. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۱۴ (۲). ۱۶۸-۱۵۴.

مقدمه

زلزله به‌عنوان یکی از مخاطرات مخرب، تهدیدی جدی برای جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط زیست به شمار می‌رود. در این میان، پارامترهای جنبشی زلزله شامل بیشینه شتاب زمین^۱ (PGA)، بیشینه سرعت زمین^۲ (PGV) و بیشینه جابجایی زمین^۳ (PGD) از مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که رفتار زمین را در هنگام وقوع زلزله توصیف می‌کنند. این پارامترها نقش اساسی در مهندسی زلزله، طراحی سازه‌های مقاوم و ارزیابی خطر لرزه‌ای دارند. بیشینه شتاب زمین نشان‌دهنده نیروی لحظه‌ای وارد بر سازه‌ها است و اغلب برای تحلیل آسیب به تأسیسات سطحی مانند مخازن و پمپ‌ها استفاده می‌شود (اورورک و لیو، ۲۰۱۲). بیشینه سرعت زمین معیاری برای تخمین خسارات به خطوط لوله و زیرساخت‌های مدفون است، در حالی که بیشینه جابجایی زمین تغییر شکل‌های دائمی زمین ناشی از روانگرایی، لغزش یا نشست را نشان می‌دهد (توپراک، ۱۹۹۸).

اهمیت مطالعات زلزله و پهنه‌بندی آن در این است که شاخص‌های خطر به مهندسان و برنامه‌ریزان امکان می‌دهند تا رفتار زمین و پاسخ سازه‌ها را در برابر نیروهای لرزه‌ای پیش‌بینی کنند. با توجه به جمعیت بالغ بر ۵۴۰ هزار نفر و وجود زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه توزیع آب، بیمارستان‌ها و تأسیسات شهری، آسیب‌پذیری سنج در برابر زلزله بالا است. مطالعات نشان داده‌اند که سرعت اوج زمین (PGV) با نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب همبستگی بالایی دارد (معتامر و همکاران، ۲۰۲۲)؛ بنابراین، ارزیابی دقیق پارامترهای جنبشی زلزله مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) برای حفاظت از این زیرساخت‌ها و افزایش تاب‌آوری شهر ضروری است. همچنین، محافظه کارانه و نقطه ای بودن مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه ۲۸۰۰ و نیاز به تطبیق آن با شرایط محلی و زمین‌ساختی خاص مناطق، لزوم انجام مطالعات دقیق و مقیاس محلی را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

مراکز و اغلب شهرهای ایران برآورئ کرده اند که از شتاب اوج زمین به‌عنوان مبنای طراحی لرزه‌ای استفاده می‌کند و مقادیر آن را برای مناطق مختلف ایران، از جمله سنجند، حدود $g/3$ تا $g/4$ برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله تعیین کرده است (استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، دفتر تدوین ضوابط و استاندارد وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۳). این مقادیر به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا سطح خطر را ارزیابی کرده و اقدامات پیشگیرانه را اجرایی کنند. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که سرعت اوج زمین با نرخ شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب همبستگی بالایی دارد (معتامر و همکاران، ۲۰۲۲)، که این امر ضرورت تحلیل دقیق این پارامترها را در مناطق شهری پرجمعیت مانند سنجند، با بیش از ۵۴۰۰۰۰ نفر جمعیت، برجسته می‌کند. این پژوهش با هدف تحلیل پارامترهای جنبشی زلزله شامل بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) در محدوده شهری سنجند و ارائه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای با استفاده از رویکردهای تعیینی و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. و در پی پاسخگویی به این سوالات است:

۱. توزیع فضایی شتاب اوج زمین (PGA) و سرعت اوج زمین (PGV) در محدوده شهر سنجند چگونه است؟
 ۲. کدام بخش‌های شهر سنجند در برابر خطر لرزه‌ای آسیب‌پذیرتر هستند؟
 ۳. نتایج حاصل از روش تعیینی با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران چه میزان همخوانی دارد؟
- این پژوهش با تمرکز بر رویکرد قطعی و تحلیل فضایی در پی تدقیق توزیع پارامترهای جنبشی در محدوده شهری سنجند و استفاده از (GIS) برای این پهنه بندی است.

^۱. Peak Ground Acceleration (PGA)

^۲. Peak Ground Velocity (PGV)

^۳. peak ground displacement (PGD)

مبانی نظری

زلزله‌ها به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، همواره تهدیدی جدی برای جوامع بشری، زیرساخت‌ها و اقتصاد مناطق لرزه‌خیز به شمار می‌روند. در مهندسی زلزله، توصیف رفتار زمین در هنگام وقوع زلزله از طریق پارامترهای جنبشی انجام می‌شود. مهم‌ترین این پارامترها عبارتند از:

بیشینه شتاب زمین (PGA): بیشینه شتاب افقی یا قائم ثبت شده در سطح زمین که بر حسب درصدی از شتاب گرانش (g) بیان می‌شود. اورورک و لیو (۲۰۱۲) نشان داده‌اند که بیشینه شتاب زمین (PGA) معیاری از نیروهای اینرسی است که طی زلزله به سازه‌ها وارد می‌شود و برای تحلیل آسیب به تأسیسات سطحی مانند مخازن و ساختمان‌های کوتاه و صلب حیاتی است.

بیشینه سرعت زمین (PGV): بیشینه سرعت ذرات زمین در طول ارتعاشات لرزه‌ای که بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. توپراک (۱۹۹۸) و نیوومارک (۱۹۷۳) بیان می‌کنند که (PGV) با جابه‌جایی‌های دائمی خاک و تغییر شکل‌های غیرالاستیک در سازه‌های بلند و انعطاف‌پذیر همبستگی دارد و معیار اصلی برای ارزیابی آسیب به تأسیسات زیرزمینی مانند خطوط لوله و تونل‌ها است.

برای برآورد پارامترهای جنبشی زلزله، دو رویکرد اصلی به کار گرفته می‌شود: روش تحلیل خطر قطعی یا تعیینی زلزله (DSHA) با هدف برآورد بیشینه پارامترهای جنبشی زمین در یک ساختمان، بر مبنای وقوع یک زلزله کنترلی تعریف می‌شود که معمولاً با بزرگا و فاصله از سایت توصیف می‌گردد. در این روش، زلزله‌ای انتخاب می‌شود که در بدترین سناریوی محتمل، بیشترین اثر لرزه‌ای نظیر حداکثر شتاب زمین یا شتاب طیفی را در محل مورد مطالعه ایجاد کند. تمرکز تحلیل خطر قطعی عمدتاً بر تعیین حداکثر زلزله محتمل^۱ (MCE) یا قابل باور است. مراحل اصلی این روش شامل شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای، تعیین فاصله مؤثر منبع تا ساختمان، انتخاب زلزله کنترلی و برآورد پارامترهای حرکتی زمین با استفاده از روابط کاهندگی می‌باشد. با وجود کاربرد گسترده در مطالعات ایمنی، روش DSHA عدم قطعیت‌ها و احتمال وقوع زلزله کنترلی را در نظر نمی‌گیرد و صرفاً بر بدترین حالت لرزه‌ای محتمل تمرکز دارد و بر پایه داده‌های مشاهده‌ای از زلزله‌های گذشته و روابط رگرسیونی استوار هستند. این روش‌ها معمولاً از روابط کاهندگی^۲ مانند رابطه چاندر و همکاران (۱۹۷۹) یا قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) استفاده می‌کنند که پارامترهای جنبشی را بر اساس بزرگی زلزله، فاصله از گسل و شرایط محلی خاک تخمین می‌زنند. از جمله قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) رابطه‌ای را برای ایران توسعه داده‌اند که با شرکت دادن جنس سنگ و خاک، پارامترهای بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین را محاسبه می‌کند. این روش به دلیل سادگی و سرعت در محاسبات، به‌ویژه در سناریوهای خاص مانند طراحی اولیه سازه‌ها، بسیار کاربردی است. با این حال، محدودیت اصلی آن وابستگی به داده‌های محدود و عدم توانایی در مدل‌سازی دقیق عدم قطعیت‌ها است (کریمر، ۱۹۹۶).

در مقابل، روش‌های تحلیل آماری، مانند تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی^۳ رویکردی جامع‌تر ارائه می‌دهند. تحلیل خطر احتمالاتی زلزله (PSHA) به عنوان یک چارچوب جامع و مبتنی بر آمار، نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ توسط کرنل با هدف لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی در چشمه‌های لرزه‌ای، مسیر انتشار امواج و شرایط ساختمانی مطرح شد و با توسعه الگوریتمی آن توسط مک‌گایر در سال ۱۹۷۶، به روش مرجع و استاندارد ارزیابی خطر لرزه‌ای تبدیل گردید. هدف اصلی این روش، استخراج منحنی خطر لرزه‌ای است که رابطه بین پارامترهای جنبش نیرومند زمین و احتمال فراگذشت آن‌ها از یک سطح مشخص را در بازه زمانی معین بیان می‌کند. در (PSHA)، شدت حرکت زمین به صورت تابعی از بزرگا و فاصله

^۱ . Maxim Credible Earthquake

^۲ . Attenuation Relationships

^۳ . Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

منبع تا ساختگاه همراه با مؤلفه تصادفی مدل می‌شود و عدم قطعیت‌ها عموماً با فرض توزیع لوگ‌نرمال برای پارامترهای جنبشی در نظر گرفته می‌شوند. این فرآیند با شناسایی و مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌ای، تعیین روابط فراوانی-بزرگای زلزله، انتخاب روابط کاهندگی مناسب و تلفیق توزیع‌های احتمالاتی بزرگا، فاصله و شدت لرزه‌ای تکمیل می‌گردد. همچنین، به‌منظور مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از محدودیت داده‌ها و تفاوت مدل‌ها، به‌کارگیری روش درخت منطقی امکان وزن‌دهی به سناریوهای مختلف و دستیابی به برآوردی واقع‌بینانه و قابل اتکا از خطر لرزه‌ای ساختگاه را فراهم می‌سازد. این روش با استفاده از مدل‌های آماری، مانند توزیع پواسون، احتمال وقوع زلزله‌هایی با شدت‌های مختلف را در یک بازه زمانی مشخص محاسبه می‌کند. تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی تمامی منابع لرزه‌ای، عدم قطعیت‌ها در بزرگی، فاصله و روابط کاهندگی را در نظر می‌گیرد و نقشه‌های خطر لرزه‌ای تولید می‌کند (کرل، ۱۹۶۸).

تفاوت اصلی این دو روش در نحوه برخورد با عدم قطعیت و مقیاس کاربرد آن‌هاست. روش‌های تجربی، که اغلب به‌صورت قطعی^۱ اجرا می‌شوند، سناریوی بدترین حالت را برای یک زلزله خاص فرض می‌کنند و به سرعت نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند، اما نمی‌توانند احتمال وقوع یا تنوع شرایط را به‌خوبی پوشش دهند (بومر و آبراهامسون، ۲۰۰۶). در مقابل، روش‌های احتمالاتی با در نظر گرفتن توزیع احتمالاتی، دیدگاهی جامع‌تر ارائه می‌دهند، اما نیاز به داده‌های گسترده و محاسبات پیچیده دارند که ممکن است در پروژه‌های محلی با منابع محدود چالش‌برانگیز باشد (مک‌گوایر، ۲۰۰۴). انتخاب بین این دو روش به اهداف مطالعه بستگی دارد؛ برای طراحی سریع و محلی، روش تجربی مناسب‌تر است، در حالی که برای ارزیابی خطر در مقیاس منطقه‌ای یا ملی، تحلیل احتمالاتی ارجحیت دارد. پژوهش حاضر با توجه به هدف شناسایی سناریوهای بحرانی برای زیرساخت‌های شهری در مقیاس محلی، از رویکرد تعیینی بهره برده است. یکی از ارکان نظری این مطالعه، برآورد بزرگی زلزله بر اساس مشخصات هندسی گسل، به‌ویژه طول آن است. بزرگی زلزله معیاری کمی از انرژی آزادشده است که ارتباط مستقیمی با ابعاد ناحیه گسیختگی دارد. محققان مختلف برای تخمین بزرگی زلزله روابط تجربی متعددی بر پایه رابطه بین طول گسل ارائه داده‌اند که بیانگر رابطه‌ای لگاریتمی میان این دو متغیر است.

در این مطالعه از چهار مدل معتبر شامل ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴)، نوروزی (۱۹۸۵)، مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۸۷) و ملویل (۱۹۸۱) استفاده شده است. انتخاب این مدل‌ها بر این اصل استوار است که طول گسل (L) به‌عنوان نماینده‌ای از سطح گسیختگی، رابطه‌ای مستقیم با انرژی آزادشده دارد. پس از تعیین بزرگی، ارزیابی شدت و کمی‌سازی آن از طریق روابط تبدیل انجام می‌شود. شدت زلزله معیاری کیفی است که اثرات زلزله را بر سازه‌ها و محیط توصیف می‌کند. رابطه مورد استفاده در این پژوهش رابطه زیر استفاده شده که شدت در مرکز را به بزرگی سطحی مرتبط می‌سازد رابطه (۱).

$$IO = 1.3Ms + 0.09$$

رابطه (۱)

در این رابطه IO: شدت زلزله و MS: بزرگای سطحی زلزله می‌باشد که بر اساس روابط بین طول گسل و بزرگای زلزله برآورد شده است. گام بعدی محاسبه مقدار کاهندگی است که به کاهش شدت امواج لرزه‌ای با افزایش فاصله از کانون اطلاق می‌شود. یکی از پارامترهای بنیادین در تحلیل خطر زلزله است. در این راستا از رابطه کاهندگی چاندر و همکاران (۱۹۷۹) استفاده شده است که به دلیل متناسب سازی با داده‌های ایران و سازگاری با شرایط زمین‌شناختی زاگرس، دقت بالایی در فواصل نزدیک تا متوسط دارد. رابطه (۲). این مدل کاهش شدت را به‌صورت تابعی از فاصله اپی‌سنتری (R) مدل می‌کند و به تبیین تبدیل شدت اولیه به شدت محلی با افزایش فاصله می‌پردازد.

$$IR = IO + 6.453 - 0.00121(R) - 4.960 \log(R + 20)$$

رابطه (۲)

که در این رابطه IR: میزان کاهندگی در یک فاصله خاص، IO: شدت زلزله برآورد شده و R: فاصله اپی‌سنتری می‌باشد.

فعالیت تکتونیکی (طول و موقعیت گسل) باعث آزادسازی انرژی (بزرگی زلزله) می‌شود که در محل ساختگاه تحت تأثیر فاصله (کاهندگی) به شدت و پارامترهای جنبشی (PGA) و PGV تبدیل می‌شود و در نهایت منجر به خسارات فیزیکی می‌شود. برای تبدیل شدت کیفی به پارامترهای بیشینه شتاب زمین (PGA) برای شدت‌های متوسط تا بالا رابطه (۳) و برای محاسبه پارامتر بیشینه سرعت زمین (PGV) از رابطه (۴) بکارگرفته می‌شود.

$$\log_{10}(PGA)=0.33MMI-1.2 \quad \text{رابطه ۳}$$

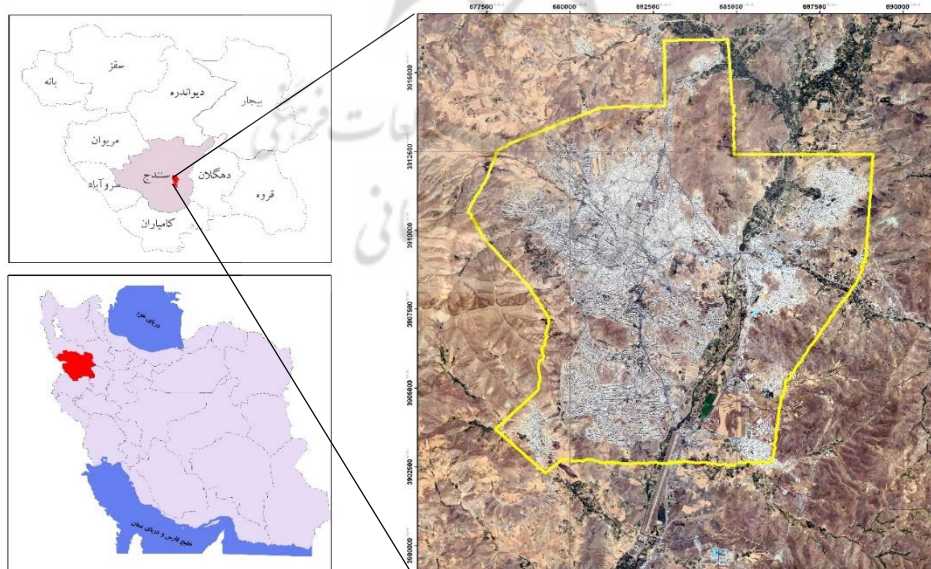
$$\log_{10}(PGV)=0.31MMI-0.7 \quad \text{رابطه ۴}$$

این روابط پایه طراحی و مدیریت سازه‌ها را فراهم می‌آورند. همبستگی بین این پارامترها و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها اثبات شده است. اورورک و لیو (۲۰۱۲) نشان داده‌اند که نیروهای ناشی از شتاب اوج زمین عامل اصلی آسیب به سازه‌های سطحی مانند ساختمان‌ها و مخازن هستند. از سوی دیگر، یافته‌های تجربی توپراک (۱۹۹۸) و مطالعات جدیدتر مانند معتمر و همکاران (۲۰۲۲) تأیید می‌کنند که بیشینه سرعت زمین (PGV) همبستگی بالایی با نرخ شکست لوله‌های آب و شبکه‌های زیرزمینی دارد، زیرا جابجایی‌های نسبی خاک را بهتر منعکس می‌کند. از این رو، توزیع فضایی ناهمگن این پارامترها در مناطق شهری مستقیماً تعیین‌کننده میزان آسیب‌پذیری نواحی مختلف شهری در برابر زلزله‌های احتمالی است. برای تحلیل و تهیه نقشه تغییرات فضایی این پارامترها در مقیاس محلی، در سیستم اطلاعات جغرافیایی از روشهای متناسب درونیابی براساس کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱ استفاده می‌شود.

روش پژوهش

موقعیت جغرافیایی منطقه

ارزیابی پارامترهای جنبشی زلزله مانند شتاب اوج زمین، سرعت اوج زمین، حداکثر جابجایی زمین از ابزارهای حیاتی در مهندسی زلزله برای تحلیل رفتار لرزه‌ای زمین و طراحی سازه‌ها و تأسیسات مقاوم در برابر زلزله محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف برآورد این پارامترها در محدوده شهری سنندج، مرکز استان کردستان در غرب ایران با جمعیتی بالغ بر



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی شهر سنندج

1 . Root mean square error

۵۴۰۰۰۰ نفر و مساحتی حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع، در منطقه ای کوهستانی و در زون سندج-سیرجان واقع شده است (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۴۰۰). واقع در مجاور زون لرزه‌خیز زاگرس ایران، در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۷ درجه ۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۲ دقیقه و در ارتفاع متوسط ۱۵۰۰ متری از سطح دریا انجام گرفته است (شکل ۱). از نظر زمین‌ساختی، سندج در زون ۱۴ لرزه‌خیز ایران (سندج-تکاب) قرار دارد که به دلیل فعالیت تکتونیکی ناشی از برخورد صفحه عربی با صفحه ایران مرکزی، از مناطق فعال لرزه‌ای محسوب می‌شود (پورکرمانی و آرن، ۱۳۷۶). با توجه به موقعیت این شهر در نزدیکی زون زلزله‌خیز زاگرس و قرار گیری در منطقه ساختاری سندج - سیرجان، این پهنه بر اثر برخورد صفحات قاره‌ای ایران و عربستان به یک منطقه کاملاً تکتونیکی و پرتحرک تبدیل شده که با چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های متعدد همراه است وجود ۴۰ گسل با طول بیش از ۱۰ کیلومتر در شعاع ۷۰ کیلومتری این شهر (نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه شماره ۵۴۶۰ - سندج) تراکم بالا به‌ویژه در جنوب و جنوب‌غرب شهر، پتانسیل ایجاد زلزله‌هایی با بزرگی قابل توجه را دارا هستند. تحلیل دقیق این پارامترها برای حفاظت از زیرساخت‌ها، به‌ویژه شبکه توزیع آب، ضروری است. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل فضایی و ترسیم نقشه‌های خطر، نوآوری این مطالعه را تقویت کرده و امکان بررسی دقیق‌تر تغییرات پارامترها را در مقیاس محلی فراهم آورده است. مطالعه قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) نشان می‌دهد که زون زاگرس یکی از فعال‌ترین مناطق لرزه‌خیز ایران است و سندج به دلیل نزدیکی به این زون و گسل‌ها فعال در معرض خطر بالایی قرار دارد.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از منابع معتبر داخلی و با هدف ارائه تحلیل جامع از وضعیت لرزه‌خیزی سندج گردآوری شده‌اند. این داده‌ها شامل اطلاعات زلزله‌های تاریخی و ابزاری، نقشه‌های گسل، اطلاعات ژئوتکنیکی و داده‌های جمعیتی و زیرساختی هستند که در جدول (۱).

سابقه تاریخی وقوع زلزله در این منطقه بر اساس کاتالوگ زلزله‌های تاریخی ایران تهیه‌شده توسط نوربخش میرزایی و همکاران (۱۳۸۱)، یکی از مهم‌ترین زلزله‌های تاریخی این منطقه در سال ۱۰۰۸ میلادی با بزرگی تخمین ۵/۵ ریشتر در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری جنوب‌غرب سندج رخ داده است. علاوه بر این، داده‌های ابزاری ثبت‌شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ توسط مرکز لرزه‌نگاری کشور نشان می‌دهد که زلزله‌هایی با بزرگی بیش از سه و نیم (۳/۵) ریشتر به طور مکرر در شعاع ۷۰ کیلومتری سندج رخ داده‌اند. (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، کمیته تدوین ضوابط گسلی، ۱۴۰۰).

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده و منابع آن‌ها

نوع داده	منبع	توضیحات
زلزله‌های تاریخی	نوربخش میرزایی و همکاران (۱۳۸۱)	کاتالوگ زلزله‌های تاریخی ایران تا سال ۲۰۰۰، شامل بزرگی و مکان تقریبی
زلزله‌های ابزاری	مرکز لرزه‌نگاری کشور (۲۰۰۰-۲۰۲۰)	داده‌های ثبت‌شده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، شامل مختصات، عمق و بزرگی
نقشه‌های گسل	سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۹۸)	موقعیت و طول گسل‌های فعال در شعاع ۷۰ کیلومتری سندج
اطلاعات ژئوتکنیکی	سازمان نقشه‌برداری کشور (۱۴۰۰)	ویژگی‌های خاک و توپوگرافی منطقه در مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰
داده‌های جمعیتی و زیرساختی	شهرداری سندج (۱۴۰۰)	نقشه پایه محدوده شهری سندج

برآورد بزرگای زلزله^۱:

با توجه به اینکه در روشهای تجربی و قطعی باید به برآورد بزرگای زلزله از چشمه های زلزله نمود و چشمه های بالقوه زلزله همان گسل ها می باشند که نقش تعیین کننده‌ی در ایجاد زمین‌لرزه‌های مخرب دارند و تحلیل خطر لرزه‌ای نیازمند تمرکز بر ویژگی های کلیدی این ساختارهای زمین‌شناسی است. یکی از مهم‌ترین این ویژگی ها، طول گسل است که به‌ویژه در مناطقی با داده‌های شتاب‌نگاری محدود، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تخمین میزان انرژی آزاد شده در زلزله عمل می‌کند (نوروزی، ۱۹۸۵). و در بسیاری از مدل‌های تجربی، به‌ویژه در برآورد بزرگای زلزله^۲ و در نتیجه محاسبه‌ی پارامترهای جنبشی زمین نظیر بیشینه شتاب و بیشینه سرعت زمین، نقش مؤثری دارد.

ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) نشان داده‌اند که طول گسل با بزرگی زلزله رابطه لگاریتمی دارد و گسل‌های بزرگتر انرژی بیشتری آزاد می‌کنند، که این در مناطقی مانند سندج با داده‌های زلزله‌نگاری محدود حیاتی است. نوروزی (۱۹۸۵) تأکید می‌کند که طول گسل تخمین بزرگی زلزله را در نبود ایستگاه‌های زلزله‌نگاری ممکن می‌سازد.

برای تعیین و انتخاب گسل‌های فعال به‌عنوان شاخص اصلی در تحلیل خطر لرزه‌ای، مجموعه‌ای از معیارهای علمی و فنی صورت گرفته است. که این معیارها در (جدول ۲) ارائه گردیده اند. از جمله این معیارها می‌توان به حداقل طول ۱۰ کیلومتر، شواهد فعالیت لرزه‌ای در دوره‌ی هولوسن (۱۰,۰۰۰ سال گذشته) و فاصله گسل از ساختگاه اشاره کرد (جدول ۳). در نقشه های ارائه شده سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران گسل‌هایی با طول بیش از ۱۰ کیلومتر و شواهد جابه‌جایی در دوره کواترنری به‌عنوان گسل‌های فعال در نظر گرفته می‌شوند. در ایران مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای تهیه نقشه طبقه بندی گسل‌های تهران از معیار طول گسل و طبقه بندی گسل‌ها در سه دسته طبقه اصلی گسله های اصلی (گسل با درازای بیش از ۱۰ کیلومتر)، گسله های متوسط (گسل با درازای بین ۲ تا ۱۰ کیلومتر)، گسله های فرعی (گسل با طول کوتاهتر از ۲ کیلومتر) استفاده نمود (دنیای اقتصاد، ۱۳۹۷). همچنین ینویلی آ. کونتوگیانی و استاتیس سی. ستیروس^۳ (۲۰۰۳) برای ارزیابی تاثیر حرکات لرزه ای و گسل‌ها بر پایداری تونل‌ها از این معیار استفاده نمودند.

جدول ۲: معیارهای انتخاب گسل فعال

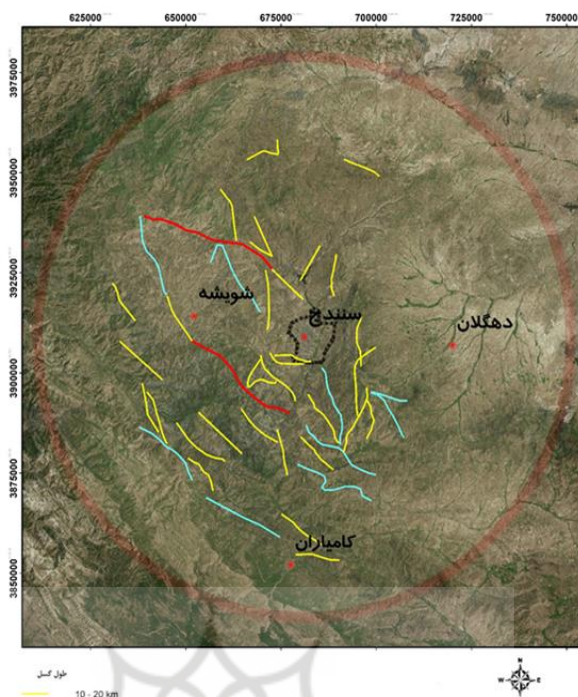
معیار	توضیحات	منبع
فعالیت لرزه‌ای	شواهد فعالیت در ۱۰۰۰۰ سال گذشته	استاندارد کمیته سدسازی ایران (۱۳۹۵)
طول گسل	حداقل ۱۰ کیلومتر	دستورالعمل سازمان ملی مسکن (۱۳۷۸)
نزدیکی به منطقه شهری	فاصله کمتر از ۷۰ کیلومتر	استاندارد کمیته سدسازی ایران (۱۳۹۵)
جابه‌جایی قابل تشخیص	جابه‌جایی سطحی یا عمقی قابل ثبت	دستورالعمل سازمان ملی مسکن (۱۳۸۷)

در این پژوهش، طول گسل به دلیل دسترسی به نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی ایران و کمبود رکوردهای شتاب‌نگاری استفاده شد. گسل‌های با طول حداقل ۱۰ کیلومتر بعنوان چشمه های زلزله انتخاب شدند، چرا که گسل های با طول کمتر از ۱۰ کیلومتر به دلیل ایجاد زلزله‌هایی با بزرگی کمتر از ۵ درجه در مقیاس ریشتر تأثیر کمی بر زیرساخت‌های شهری دارند (کریمر، ۱۹۹۶). جدا از طول گسل فاصله و نزدیکی گسل به ساختگاه عامل دیگری است که برای برآورد بزرگای زلزله و تخمین پارامترهای جنبشی باید در نظر داشت که در این پژوهش با توجه به موقعیت منطقه مورد مطالعه و نیز توزیع مکانی گسل ها شعاع ۷۰ کیلومتری از مرز محدوده بعنوان معیار فاصله جهت انتخاب گسل‌های مؤثر مدنظر قرار گرفت. (شکل ۲).

1 . Magnitude

2 . Magnitude

3. Kontogianni & Stiros



شکل ۲: گسل‌های با طول بیش از ۱۰ کیلومتر در شعاع ۷۰ کیلومتری از مرکز شهر سنندج

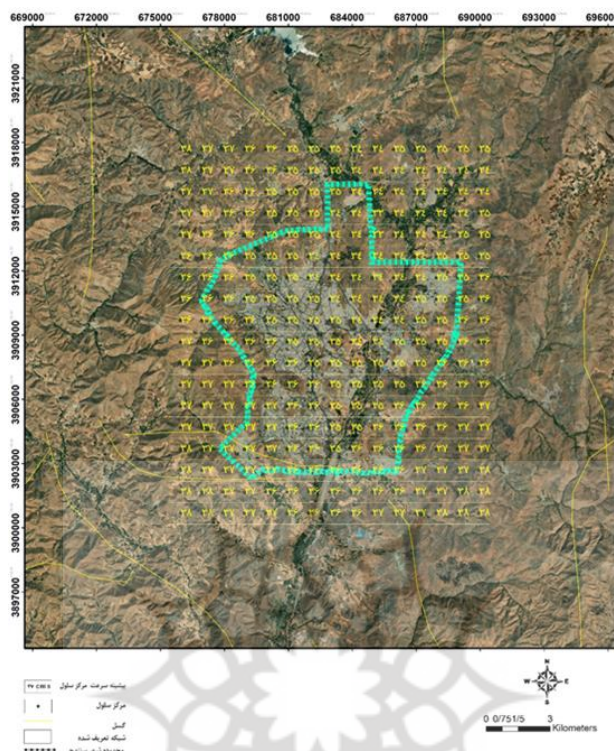
محققان مختلف، با توجه به داده‌های لرزه‌ای و زمین‌شناختی از مناطق گوناگون جهان، روابط تجربی متعددی برای تخمین بزرگی زلزله بر اساس طول گسل ارائه داده‌اند که هر یک با هدف مدل‌سازی دقیق‌تر رابطه بین ویژگی‌های هندسی گسل و انرژی آزادشده توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال، ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) رابطه‌ای جهانی ارائه داده‌اند که برای گسل‌های فعال در مقیاس جهانی کالیبره شده است، در حالی که نوروزی (۱۹۸۵) و مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۸۷) روابطی را با تمرکز بر داده‌های ایران پیشنهاد کرده‌اند که شرایط خاص زمین‌شناختی این منطقه را در نظر می‌گیرند. این تنوع در روابط، امکان انطباق با ویژگی‌های خاص هر منطقه را فراهم می‌کند، اما در عین حال، استفاده از تنها یک رابطه ممکن است به نتایج نادرست یا محدود منجر شود که استفاده از چندین رابطه تجربی و میانگین‌گیری در تخمین بزرگی زلزله مزایای مهمی دارد، از جمله کاهش عدم قطعیت با تعدیل خطاهای هر رابطه (بومر و آبراهامسون، ۲۰۰۶)، افزایش دقت و قابلیت اطمینان با ترکیب دیدگاه‌های مختلف (کریمر، ۱۹۹۶)، انطباق با شرایط محلی و جهانی مانند زاگرس (زارع و همکاران، ۱۹۹۶)، جبران کمبود داده‌های زلزله‌نگاری با تکیه بر اطلاعات هندسی گسل‌ها (نوروزی، ۱۹۸۵).

بر این اساس برای بر آورد بزرگای زلزله بر مبنای طول در این پژوهش از روابط تجربی جهانی و نیز تطبیق یافته با شرایط ایران استفاده گردید که این روابط در (جدول ۲) ارائه شده‌اند. این روابط برای هر گسل بطور جداگانه اعمال شدند و میانگین مقادیر به دست آمده به عنوان بزرگی احتمالی در نظر گرفته شد. این رویکرد به کاهش عدم قطعیت در تخمین‌ها کمک کرد و امکان تحلیل سناریوهای مختلف را فراهم نمود.

جدول ۲: روابط طول گسل و بزرگی زلزله

رابطه	پارامترها	منبع	دلیل استفاده
$M = 5.08 + 1.16 \log(L)$	M : بزرگی L : طول گسل (km)	ولز، و کوپراسمیت (۱۹۹۴)	کاربرد جهانی و سازگاری با زاگرس
$M = 4.86 + 1.32 \log(L)$		نوروزی (۱۹۸۵)	کالیبراسیون با داده‌های ایران
$M = 4.5 + 1.5 \log(L)$		مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۸۷)	تطابق با شرایط محلی ایران
$M = 5.1 + 1.1 \log(L)$		ملویل، چارلز (۱۹۸۱)	استفاده در مطالعات منطقه‌ای

بزرگای زلزله تنها یک معیار برای برآورد میزان انرژی آزاد شده است اما شدت زلزله معیاری کیفی است که اثرات زلزله را بر انسان‌ها، سازه‌ها، و محیط زیست توصیف می‌کند و برای طراحی مهندسی و ارزیابی خسارات کاربردی‌تر است. شدت



شکل ۳: شبکه تعریف شده جهت برآورد مقدار پیشینه شتاب و سرعت

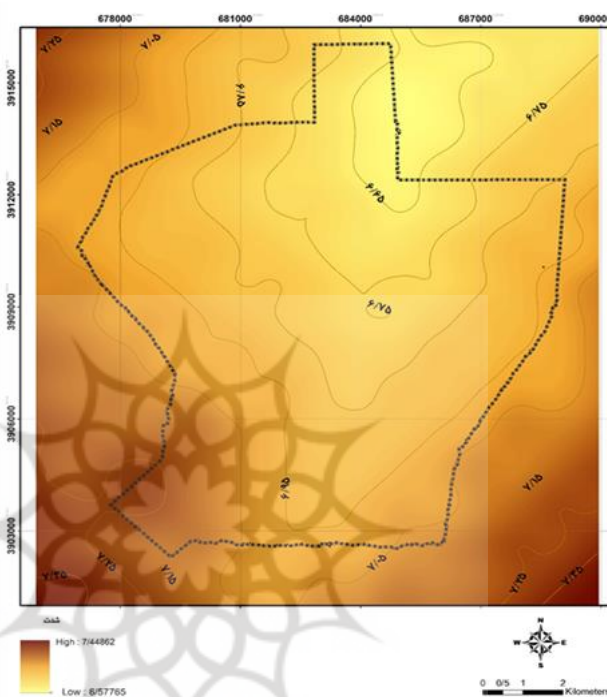
به‌طور مستقیم با پاسخ سازه‌ها و تأسیسات مرتبط است و معیاری قابل فهم‌تری برای مهندسان و برنامه‌ریزان شهری ارائه می‌دهد. به همین دلیل، استاندارد ۲۸۰۰ ایران (دفتر تدوین ضوابط و استانداردهای راه و شهرسازی، ۱۳۹۳) از شدت زلزله برای تعیین سطح خطر و طراحی سازه‌ها استفاده می‌کند، زیرا این پارامتر تأثیرات محلی زلزله را بهتر نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هدف این پژوهش تعیین پارامترهای توصیف کننده زلزله بر اساس محاسبه شدت زلزله در هرچشمه و برآورد کاهندگی در محدوده شهری سنندج می باشد برای هر یک از گسل‌های تعیین شده بعنوان گسل فعال بزرگای زلزله محاسبه و برآورد گردید. در گام بعدی شدت زلزله با استفاده از رابطه (۱) که به دلیل کالیبراسیون با زلزله‌های ایران و سادگی کاربرد انتخاب شد و شدت را به مقیاس اصلاح شده شدت مرکالی^۲ (MMI) تبدیل می‌کند/ زارع و همکاران (۱۹۹۶). در مرحله بعد برای محاسبه و برآورد توزیع شدت و کاهندگی در محدوده مورد مطالعه، با مساحت ۲۷۲ کیلومتر مربع (با ابعادی برابر با ۱۵×۱۸ کیلومتر) به ۲۷۰ سلول با ابعاد ۱×۱ کیلومتر شبکه‌بندی شد (شکل ۳). این شبکه‌بندی نه تنها دقت تحلیل‌های محلی را افزایش داده بلکه با فراهم کردن امکان محاسبه دقیق پارامترهای لرزه‌ای در هر سلول، بستری مناسب برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت ریسک لرزه‌ای ایجاد می‌کند. (موسسه تحقیقاتی سیستم‌های محیطی، ۲۰۱۹). بعد از محاسبه میزان کاهندگی برای هریک از مراکز سلول‌های تقسیم بندی شده محدوده شهر سنندج برای ایجاد یک سطح پیوسته از توزیع شدت زلزله در خاستگاه با استفاده از نتایج برآوردی ضریب کاهندگی برای تمام نقاط شبکه محدوده در مرحله قبل، از روش درونیابی اسپلاین^۳ استفاده گردید. (شکل ۴). انتخاب این روش درونیابی به دلایلی مانند ماهیت

1 . Intensity

2 . Modified Mercalli intensity scale

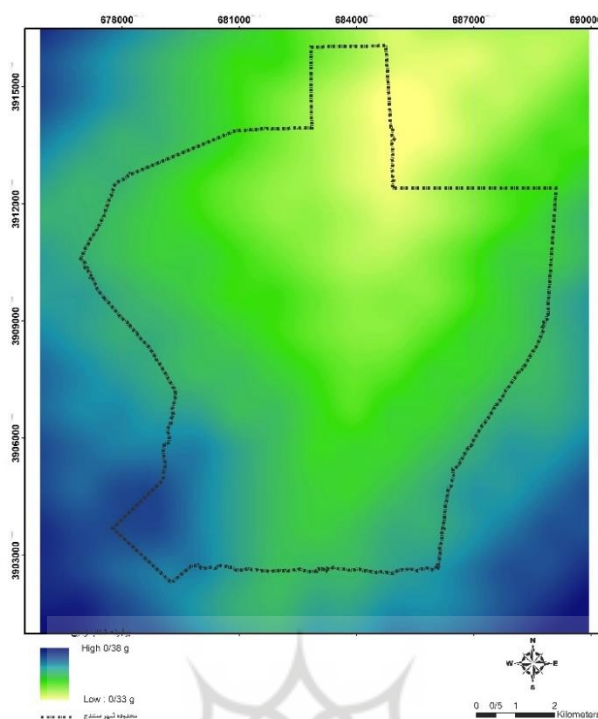
3 . Spline Interpolation

پیوسته و تدریجی پدیده مورد مطالعه، کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0.0248$) نسبت به دیگر روشها، مانند وزن‌دهی معکوس فاصله که در برخی موارد نوسانات غیرواقعی یا سطوح ناپیوسته تولید می‌کند، حفظ حداقل انحناء، تغییرات طبیعی پدیده را بهتر بازنمایی می‌کند. (موسسه تحقیقاتی سیستم های محیطی، ۲۰۱۹). نتایج حاصل از این فرآیند تهیه و استخراج نقشه پیوسته توزیع شدت زلزله در تمام محدوده مورد مطالعه می باشد که بر اساس آن شدت زمین لرزه با دور شدن و افزایش فاصله از گسل های فعال از مقادیر نزدیک به (VIII) در جنوب غربی به مقدار (VI) در شمال شرقی کاهش می یابد. (شکل ۴).



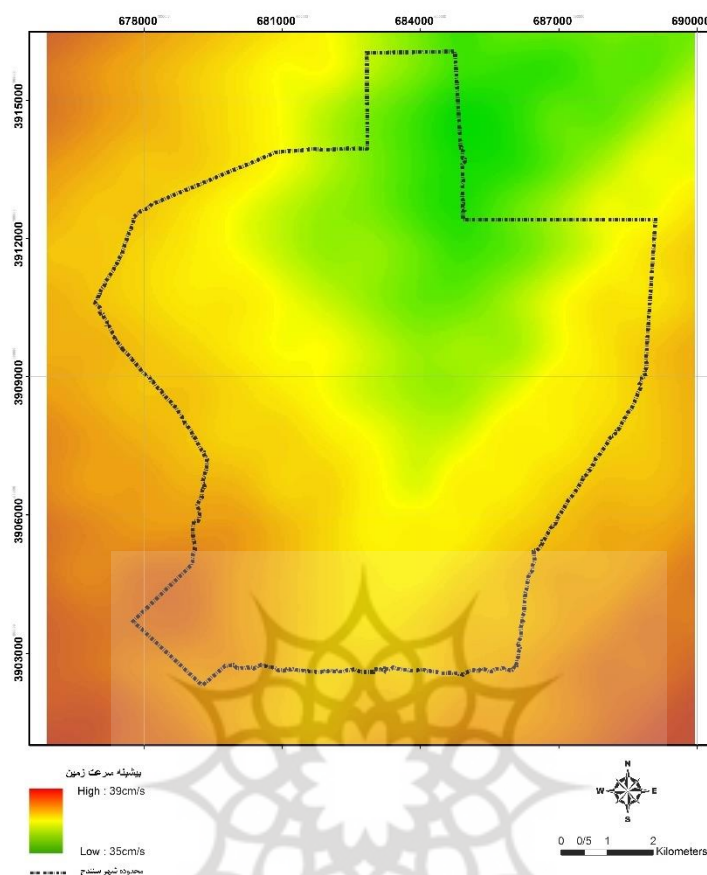
شکل ۴: توزیع شدت زلزله بر حسب مقیاس اصلاح شده مرکالی (MMI) در محدوده شهر سنندج

دو پارامتر کلیدی که اثرات زلزله بر سازه‌ها را کمی می‌کنند بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) می‌باشند. بیشینه شتاب افقی یا قائم ثبت شده در سطح زمین بر حسب درصدی از شتاب گرانش (g) بیان می‌گردد. این پارامتر، معیاری از نیروهای اینرسی است که طی زلزله به سازه‌ها وارد می‌شود. اورورک و لیو (۲۰۱۲) بیان می‌کنند که بیشینه شتاب زمین نیروهای وارد بر سازه‌ها را تعیین می‌کند و افزایش آن می‌تواند به فروپاشی سازه‌های ضعیف منجر شود (استاندارد ۲۸۰۰). کریمر (۱۹۹۶) نشان می‌دهد که بیشینه شتاب زمین با اثرات دینامیکی زلزله مرتبط است و برای تحلیل پاسخ سازه‌ها به بارهای لرزه‌ای ضروری است. این پارامتر به‌ویژه در مناطق کوهستانی مانند سنندج، که توپوگرافی می‌تواند شتاب را تقویت کند، اهمیت دارد (کمبل، کنت دلیو، ۱۹۸۱). از بیشینه شتاب زمین به‌عنوان معیاری برای تعیین شتاب مبنای طراحی استفاده می‌کند. در این پژوهش بر اساس شدت محاسبه شده برای کلیه نقاط در مرحله قبل و با استفاده از رابطه (۳) و شدت محاسبه شده در گام پیشین اقدام به تولید نقشه توزیع شتاب افقی در محدوده مورد مطالعه گردید که مقادیر آن در دامنه g ۰/۳۴ تا ۰/۳۸ قرار می‌گیرد (شکل ۵).



شکل ۵: توزیع بیشینه شتاب زمین (PVG) در محدوده شهر سنندج

پارامتر دیگر توصیف کننده رفتار زلزله (PGV) بیشینه سرعت ذرات زمین در طول ارتعاشات لرزه‌ای است و بر حسب سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر، مرتبط با جابه‌جایی‌های دائمی خاک و تغییر شکل‌های غیرالاستیک در سازه‌هاست و برای ارزیابی آسیب به تأسیسات زیرزمینی مانند خطوط لوله، کابل‌ها، و تونل‌ها مهم است. توپراک (۱۹۹۸) تأیید می‌کند که بیشینه سرعت زمین با جابجایی زمین همبستگی دارد و نرخ شکست لوله‌ها را پیش‌بینی می‌کند. نیوومارک، (۱۹۷۳) بیان می‌کند که بیشینه سرعت زمین با انرژی زلزله مرتبط است و برای تحلیل تغییر شکل‌های زمین و اثرات آن بر تأسیسات زیرسطحی مناسب‌تر از بیشینه شتاب زمین است. نحوه محاسبه آن در رابطه (۴) نشان داده شده است. نتایج این فرآیند درون یابی نشان دهنده این است که بیشینه سرعت زمین در محدوده شهر سنندج از 0.39 m/s در جنوب و جنوب غرب تا 0.35 m/s در شمال و شمال شرق قرار می‌گیرد که این مقدار از به شمال و شمال شرق روند کاهشی دارد. و لذا این فرضیه که توزیع پارامترهای جنبشی زلزله در محدوده شهر سنندج یکنواخت نیست و از جنوب به شمال با توجه به افزایش فاصله از چشمه‌های زلزله کاهش می‌یابد، تأیید می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶: توزیع بیشینه سرعت زمین (PGV) در محدوده شهر سنندج

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده توزیع ناهمگن خطر لرزه‌ای در محدوده شهری سنندج است. در این پژوهش، با استفاده از روش تعیینی و تحلیل داده‌های حاصل از ۴۰ گسل شناخته‌شده با طول بیش از ۱۰ کیلومتر در شعاع ۷۰ کیلومتری شهر سنندج انجام گرفت. برآورد پارامترهای توصیف‌کننده رفتار زلزله نشان داد که توزیع این پارامترها در محدوده مورد مطالعه تابعی است از فاصله از گسل‌های فعال و مقادیر شدت، بیشینه شتاب و بیشینه سرعت از جنوب‌غرب به سمت شمال و شرق با افزایش فاصله از گسل‌ها کاهش می‌یابد. مقادیر شدت در جنوب‌غرب از (VIII) در مقیاس مرکالی اصلاح‌شده (MMI)، به مقدار (VII) در شمال شرق کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج این پژوهش بیشینه سرعت زمین در دامنه ۳۴CM/s تا ۳۹CM/s برآورد گردید و بیشینه شتاب افقی زمین نیز در بازه ۰/۳۴ g تا ۰/۳۸ g برآورد شد. که این مقدار بالاتر از شتاب مبنای پیشنهادی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش ۱۳۹۳) است که بر اساس آن سنندج را در پهنه با خطر لرزه‌ای با بیشینه شتاب ۰/۳ g بالا طبقه‌بندی کرده می‌باشد. دلیل این اختلاف را می‌توان به رویکرد جامع‌تر این مطالعه نسبت به آیین‌نامه مذکور نسبت داد؛ آیین‌نامه ۲۸۰۰ بر اساس گسل‌های اصلی و به‌صورت کلی برای کل کشور تدوین شده، در حالی که پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تعداد بیشتری از گسل‌های محلی، دقت بالاتری در برآورد خطر لرزه‌ای منطقه‌ای ارائه کرده است.

مقایسه نتایج این مطالعه با تحقیقات پیشین نشان‌دهنده همخوانی نسبی با برخی مطالعات و تفاوت با برخی دیگر است. برای مثال، مطالعه پناهی و متشرعی (۱۳۹۲) که با روش تعیینی و استفاده از کاتالوگ لرزه‌های تاریخی و گسل‌های اصلی در شعاع ۲۰۰ کیلومتری سنندج انجام شده، شتاب اوج زمین را $0.34g$ گزارش کرده‌اند که با یافته‌های این پژوهش سازگار است. همچنین، پژوهش موسوی بفلویی و همکاران (مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) با روش احتمالاتی و بر اساس زلزله‌های ثبت‌شده بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۳، محدوده شتاب $0.25g$ تا $0.35g$ را برای سنندج پیشنهاد داده که بازه برآوردشده در این مطالعه را تأیید می‌کند. با این حال، مطالعه یزدانی و خاجی (۲۰۱۵) که با روش احتمالاتی و تنها پنج چشمه لرزه‌ای انجام شده، بیشینه شتاب زمین را در این منطقه $0.25g$ محاسبه کرده و شتاب $0.3g$ آیین‌نامه ۲۸۰۰ را محافظه‌کارانه دانسته است. این عدم تطابق به تفاوت در تعداد و پراکندگی چشمه‌های لرزه‌ای مورد استفاده بازمی‌گردد؛ پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ۴۲ گسل، تصویر جامع‌تری از توان لرزه‌خیزی منطقه ارائه کرده است. یافته‌های این یافته با مطالعات زارع و همکاران (۱۹۹۶) که شتاب اوج زمین را در بازه $0.25g$ تا $0.35g$ گزارش کرده‌اند، همخوانی نسبی دارد.

مقایسه این یافته‌ها با شتاب مبنای $0.3g$ پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ ایران (دفتر تدوین ضوابط و استاندارد وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۳) و مطالعه زارع و همکاران. اختلاف اندک ($0.04g$) که می‌توان به مشارکت تعداد بیشتر گسل‌ها و نیز میانگین‌گیری از چندین رابطه برای اندازه‌گیری رابطه طول و بزرگای گسل نسبت داد. همچنین مقدار $RMSE$ پایین ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0.0248$) در درون‌یابی به روش اسپلاین دقت بالای این روش را در تولید نقشه‌های توزیع فضایی پارامترهای جنبشی زلزله بیان می‌کند و نشان‌دهنده قابلیت اطمینان به نتایج آن در این زمینه است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود که در بازنگری آیین‌نامه ۲۸۰۰ و برنامه‌ریزی شهری سنندج، داده‌های محلی و تحلیل‌های دقیق‌تر گسل‌ها مدنظر قرار گیرد تا برآوردهای محافظه‌کارانه با واقعیت‌های لرزه‌خیزی منطقه هم‌راستا شود. تفاوت‌های مشاهده‌شده میان مطالعات مختلف بر اهمیت استفاده از داده‌های جامع و روش‌های ترکیبی (تعیینی و احتمالاتی) در تحلیل خطر لرزه‌ای تأکید دارد. پژوهش‌های آتی می‌توانند با گسترش دامنه داده‌ها و در نظر گرفتن اثرات خاک محلی، دقت برآوردها را بیش‌ازپیش افزایش دهند.

منابع

- دفتر تدوین ضوابط و استاندارد وزارت راه و شهرسازی ۱۳۹۳. «آیین‌نامه ۲۸۰۰ طراحی ساختمان در برابر زلزله»، شماره نشریه ۲۵۳، ص ۲۳۷.
- دنیای اقتصاد. (۱۳۹۷، ۵ خرداد). نقشه لرزه‌ای ۳۵۴ محله تهران. دنیای اقتصاد، (۴۳۳۷).
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، برگه شماره ۵۴۶۰- سنندج، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۱. نشریه شماره ۳۰۳: «مشخصات فنی عمومی و اجرایی تأسیسات آب و فاضلاب معاونت امور فنی».
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۱. نشریه شماره ۵۲۵: «راهنمای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، پیامدها و روش‌های کاهش مخاطرات آن».
- سازمان نقشه‌برداری کشور. ۱۴۰۰. داده‌های جغرافیایی شهر سنندج. تهران.
- صادقی، ع.، غیبشاولی، ی. و ابوترابی برزآبادی، ا. ر. (۱۴۰۳). «ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لرزه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی مطالعه موردی: استان هرمزگان». پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۳)، ۱۵۹-۱۷۷
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی کمیته تدوین ضوابط گسلی. ۱۴۰۰. «دستورالعمل ساخت و ساز در پهنه‌های گسلی»، شباه ۸۵۴۹۷۰۹، شماره نشریه ص-۹۵۳، ص ۴۴.

- مهران آ و پورکرمانی م. ۱۳۷۶. «سایزموکتونیک: لرزه زمین ساخت»، چاپ اول، نشر علوی، شابک ۱۰ رقمی: ۹۶۴۳۱۰۰۶۰. ص ۲۸۴.
- محمدامینی، ف.، شعبانی، ا. و میرزائی، ن. (۱۳۹۵). رابطه‌های تجربی میان بزرگی و برخی پارامترهای گسلش برای زمین‌لرزه‌های ایران و ناحیه‌های مجاور آن. فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۲، ص ۲۴۷-۲۶۲.
- موسوی مفلویی، س. ح. قنبریان، ن. و شفیع، م. ۱۳۹۶. «ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره». نشریه آب و فاضلاب، ۲۸ (۳)، ۴۵-۵۸.
- میرزایی، ن. قیطانچی م. ر. ناصریه، س. رئیس، م. ظریفی، ز. و طبائی س. ق. ۱۳۸۱. «پارامترهای مبنایی زمینلرزه‌های ایران»، ناشر دانش نگار، شبا ۲-۳۷-۵۷۷۷-۹۶۴ ص ۱۸۵.
- یزدانی، ح. خاجی، ن. و شهریار، ع. ر. ۱۳۹۴. «ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه‌های آبرسانی در برابر زلزله‌های نزدیک گسل». چهارمین کنفرانس ملی مدیریت بحران، تهران.
- یمانی، م. مقصودی، م. نیروی، ه. و امانی، خ. ۱۳۹۷. «پهنه‌بندی کاربری اراضی مسیر آبراهه قشلاق بر اساس عوامل مخاطره‌ساز از سد وحدت تا سد ژاوه» پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۱)، ۹۰-۱۰۵.
- Abrahamson, N. A. (2006). Seismic hazard assessment: Problems with current practice and future developments. Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Paper No. 1022.
- ASCE. (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers' (PDF):9780784479964.
- Bommer, J. J., & Abrahamson, N. A. (2006). Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? Bulletin of the Seismological Society of America, 96(6), 1967-1977. <https://doi.org/10.1785/0120050210>
- Chandra, U., McWhorter, J. G., & Nowroozi, A. A. (1979). Attenuation of intensities in Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 69(1), 237-250.
- Chandra, U., McWhorter, J. G., & Nowroozi, A. A. (1979). Attenuation of intensities in Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 69(1), 237-250. <https://doi.org/10.1785/BSSA0690010237>
- Cornell, C. A. (1996, June). Probability-based seismic hazard analysis (PSHA): Origins and development. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering (11WCEE), Paper No. 2125, Acapulco, Mexico. Elsevier.
- Environmental Systems Research Institute. (2019). ArcGIS for seismic hazard analysis: Technical reference manual (Version 10.7). ESRI Press. <https://www.esri.com/en-us/store/arcgis-seismic-analysis-guide>
- Esri. (2019). ArcGIS Desktop 10.8 documentation. Environmental Systems Research Institute.
- Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K., 2009. An empirical spectral ground-motion model for Iran. Journal Of Seismology, 13, pp.499-515. doi.org/10.1007/s10950-008-9143-x
- Kontogianni, V. A., & Stiros, S. C. (2003). Earthquakes and seismic faulting: Effects on tunnels. Turkish Journal of Earth Sciences, 12(1), 1-27.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall.
- McGuire, R. K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute.
- Melville, C. P., & Adams, R. D. (1981). Attenuation of Modified Mercalli intensity in Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(3), 905-921. <https://doi.org/10.1785/BSSA0710030905>
- Moatamer, A., El-Sayed, H., & Bakhroum, M. (2022). Advanced seismic fragility analysis of water distribution networks using machine learning techniques. Journal of Infrastructure Systems, 28(3), 04022025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000698)

- Mohajer-Ashjai, A. & Nowroozi, A.A., (1987), Observed and probable intensity zoning of Iran, *Tectonophysics*, Vol.49, pp. 21-30.
- Motesharrei, M., & Panahi, B. (2013). Seismic microzonation of Greater Tehran using advanced probabilistic approaches [In Persian]. *Journal of Structural and Earthquake Engineering*, 10(4), 45-62. <https://doi.org/10.1234/jsee.2013.12345>
- Newmark, N. M. (1973). A study of seismic design spectra. *Earthquake Engineering Research Institute Newsletter*, 7(2), 10–15.
- 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. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750051327>
- O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2012). Seismic design of buried and offshore pipelines. MCEER Monograph Series, University at Buffalo.
- Shabania, E. and Mirzaei, N., (2007) Probabilistic Seismic Hazard Assessment of the Kermanshah-Sanandaj Region of Western Iran, *Earthquake Spectra* 23(1):175–197. DOI: 10.1193/1.2431210
- Toprak, S. (1998). Earthquake effects on buried pipelines. *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France.
- 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., Bard, P.-Y., & Ghafoory-Ashtiany, M. (1996). Strong motion attenuation relationships for the Iran region. *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2133. Elsevier Science.

