



University of Tehran

Environmental

Hazards

Management



Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Strong Ground Motion Assessment in Southwest Alborz, Iran

Fereshteh Pourmohammad¹ | Mehdi Zare^{2*} | Arezou Dorostian³ | Bahram Akasheh⁴ | Masoud Mojarab⁵

1. Department of Geophysics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: F.pourmohammad@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Engineering Seismology, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Department of Geophysics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: mzare@iiees.ac.ir
3. Department of Geophysics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Dorostian382@yahoo.com
4. Department of Geophysics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: Akashe@ut.ac.ir
5. Department of Mining Engineering, Engineering Faculty, Tehran University. Department of Geophysics, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: mmojarab@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received 29 December 2022

Revised 16 February 2023

Accepted 19 February 2023

Keywords:

Attenuation relationships, Magnitude, Return period, Hazards, Seismic sources.

ABSTRACT

Alborz Province is located west of Tehran Province on the South Alborz seismic belt. The city of Karaj, having a population of 2.2 millions, is located in the South West of Alborz Mountain Belt in Northern Iran. The region is known to be a highly active seismic zone. This study is focused on the geological and seismological analyses within a radius of 200 km from the center of Karaj. There are identified five seismic zones and seven linear seismic sources. The maximum magnitude was calculated for the seismic zones using available correlations. The Kijko and Sellevoll (1992) method was used to calculate seismicity parameters, and the graphs of the return period and the probability frequency of recurrence of the earthquake magnitude in each zone were plotted for the 475-year return period. According to the calculations, the highest and lowest earthquake magnitudes of 7.6 and 6.2 were respectively obtained in Zones 1 and 4. In addition, the maximum strong horizontal ground motion for the 475-year return period 0.42g and for 2475-year return period 0.70g also the maximum strong vertical ground motion for 475-year return period 0.25g and 2475-year return period 0.44g was calculated using attenuation relationships Zare 1999, Ambraseys 1995, Boore, Joyner and Fumal 1981 in studying region.

Cite this article: Pourmohammad, F., Zare, M., Dorostian, A., Akasheh, B., Mojarab, M. (2023). Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Strong Ground Motion Assessment in Southwest Alborz, Iran. *Environmental Hazards Management*, 9 (4), 311-323. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.353115.760>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.353115.760>

Introduction

A significance of seismic studies is that the correct seismic analysis of any type (seismic hazard analysis, seismic risk analysis, ground seismic response analysis, seismic site effects, and structural dynamic analysis) can offer useful economic parameters and avoid conservative design and implementation, which lead to an irrational increase in project costs and poor implementation, which in turn causes increased risk and possibility of destruction. According to the seismotectonic map of

Iran (Berberian, 1976), earthquakes in Alborz are shallow. There are also some intermediate earthquakes, and overall, the eastern Alborz is more earthquake prone than the western Alborz [1].

Materials and Methods

The maximum magnitude (M_{max}) is usually estimated based on the general characteristics of seismic activity and geological similarities. In applied studies, M_{max} is often estimated based on correlation of seismic magnitude and different fault parameters such as rupture, fracture surface area, maximum surface displacement, and seismic moment release rate. Multiple correlations have been proposed to relate these parameters and the earthquakes magnitude. (Table 1) shows some correlations by different scholars. Correlations in (Table 1) were used to calculate the maximum empirical magnitude [3].

Table 1. Correlations between the earthquake magnitude and different fault parameters

No.	Proposed by	Correlation
1	Mohajer and Nowroozi (1978)	$M_s = 5.4 + \log L_R$
2	Zare (1995)	$M_w = 3.66 + 0.91 \ln L_R$
Ms: Surface wave magnitude		Lf: Fault length (km)
Mw: Moment magnitude		L _R : Rupture length (km)

Seismicity Parameter Estimation

The K-S method was used to achieve seismicity parameters within the scope of this study [2].

Discussion and Results

The results of probabilistic seismic hazard analysis were calculated using attenuation relationships Zare 1999 [4], Ambraseys 1995, Boore, Joyner and Fumal 1981 in studying region. These results are presented in (Table 2) and (Table 3).

Table 2. strong vertical ground motion

Return period	H.PGA(g)
475	0.25
2475	0.44

Table 3. strong Horizontal ground motion

Return period	H.PGA(g)
475	0.42
2475	0.70

Conclusion

The recent Malard Earthquake with a magnitude of 5.2 on the Richter scale and multiple earthquakes with magnitudes above 4 have increased the importance of seismic studies in the region. Seismic hazard studies are among the key preliminary urban development studies for preventing seismic vulnerability. The identification of seismic source zones is closely related to development infrastructure in any region. The results of these studies are widely used in vital projects such as water, gas, oil transmission lines, dam and airport construction, and residential development, and overlooking them may cause great damages. The earthquake hazard analysis based on the accurate location of seismic zones will provide more reliable results. The investigation of the region under study, its history of seismicity, and the recent earthquakes indicate the existence of seismic activity in the region. Considering the shallow depth of earthquakes, the intensity of earthquakes occurred in the region is high. Moreover, the calculation of β and λ parameters (ranging from 6.2 to 7.6) shows the seismicity of the region, indicating the need for observing safety measures in the constructions in the region. As mentioned earlier, the recent seismic activities and earthquakes in the region have doubled the importance of seismic studies and measures for strengthening seismic stations in the region. Moreover, the review of seismic catalogs show that the study area has been inactive over the past few decades and hence its sudden activity is quite significant. Also according to the calculations, Alborz Province is located in highly active seismic zone.

References

- Berberian, M., Contribution to the Seismotectonics of Iran, Geol. Sur. Iran, (1976).
- Kijko, A. and Sellevoll, M.A "Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity", Bulletin of the Seismological Society of America, 82, pp.120-134, (1992).
- Nowroozi, A.A., and Mohajer-Ashjai, A, Fault movements and tectonics of Eastern Iran: boundaries of the Lut plate. Geophys. J. R. astr. Soc.,83, (1985).
- Zare, M., Contribution a l'etude des mouvements forts en Iran: du Catalogue aux lois d'attenuation, These de Doctorat (PhD Thesis), Universite Joseph Fourier, Gemoble, France, (1999).



شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: <https://jhsci.ut.ac.ir>



دانشگاه تهران

تحلیل خطر احتمالی زلزله و ارزیابی جنبش نیرومند زمین در جنوب غرب البرز

فرشته پورمحمد^۱ | مهدی زارع^{۲*} | آرزو درستیان^۳ | بهرام عکاشه^۴ | مسعود مجرب^۵

۱. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: F.pourmohammad@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه زلزله‌شناسی مهندسی، پژوهشگاه بین‌المللی مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: iees.ac.ir@mzare
۳. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Dorostian382@yahoo.com
۴. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: Akash@ut.ac.ir
۵. گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران. گروه ژئوفیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mmojarab@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

استان البرز در غرب استان تهران روی نوار لرزه‌ای جنوب البرز قرار دارد. شهر کرج با ۲/۲ میلیون نفر جمعیت در جنوب غربی رشته‌کوه البرز در شمال ایران واقع شده است. این منطقه از مناطق لرزه‌خیز بسیار فعال محسوب می‌شود. در این پژوهش برپایه تجزیه و تحلیل‌های زمین‌شناختی و لرزه‌شناختی در شعاع ۲۰۰ کیلومتری از مرکز شهر کرج پنج پهنه لرزه‌زا و هفت چشمه لرزه‌ای خطی شناسایی شد. با توجه به روابط تجربی، بیشینه بزرگی برای پهنه‌های لرزه‌زا و با استفاده از روش کیکو-سلوول پارامترهای لرزه‌خیزی محاسبه شد و نمودارهای دوره بازگشت بزرگای زمین‌لرزه و فراوانی احتمال رویداد بزرگای زمین‌لرزه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال برای هر پهنه رسم شد. با توجه به محاسبات صورت‌گرفته، بیشترین بزرگای ۷/۶ در پهنه ۱ و کمترین بزرگای ۶/۲ در پهنه ۴ است. براساس روابط کاهندگی زارع (۱۹۹۹)، امبرسیز (۱۹۹۵) و جویئر، بور و فومال (۱۹۸۱) بیشترین جنبش نیرومند افقی زمین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال g ۰/۴۲ و برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال g ۰/۷۰ و همچنین بیشترین جنبش نیرومند قائم زمین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال g ۰/۲۵ و برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال g ۰/۴۴ محاسبه شد. بر این اساس ارائه مدل جدید لرزه‌زمین‌ساختی منطقه استان البرز و بیشینه توان لرزه‌ای چشمه‌های لرزه‌زای منطقه استان البرز نوآوری این مقاله است.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

کلیدواژه:

بزرگا،

جنبش زمین،

چشمه‌های لرزه‌زا،

دوره بازگشت،

روابط کاهندگی.

استناد: پورمحمد، فرشته؛ مهدی، زارع؛ مهدی، درستیان، آرزو؛ عکاشه، بهرام؛ مجرب، مسعود (۱۴۰۱). تحلیل خطر احتمالی زلزله و ارزیابی جنبش نیرومند زمین در جنوب غرب البرز. مدیریت مخاطرات محیطی، ۹ (۴)، ۳۱۱-۳۲۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.349481.749>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2023.349481.749>

مقدمه

در بررسی زمین لرزه با تحلیل لرزه‌ای درست از هر نوع (تحلیل خطر لرزه‌ای، تحلیل ریسک لرزه‌ای، تحلیل پاسخ لرزه‌ای زمین، تحلیل اثرهای ساختگاهی زلزله و تحلیل دینامیکی سازه) می‌توان به پارامترهای مطلوب و اقتصادی دست یافت و از طراحی و اجرای محافظه‌کارانه که سبب افزایش غیرمنطقی هزینه‌های پروژه می‌شود و همچنین از اجرای دست پایین که سبب افزایش خطرپذیری و قابلیت تخریب می‌شود دوری جست.

پهنه رسوبی- ساختاری البرز شامل بلندی‌های شمال صفحه ایران است که به شکل تاقدیس مرکب در راستای عمومی خاوری- باختری از آذربایجان تا خراسان امتداد دارد. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی، مرز شمالی البرز منطبق بر تپه‌ماهورهای متشکل از نهشته‌های ترشیری و دشت ساحلی خزر است. از نگاه زمین‌شناختی، مرز شمالی البرز محدود به زمیندرز تیس کهن است که از برخورد سنگ‌کره قاره‌ای البرز با سنگ‌کره توران در تریاس پسین به وجود آمده است. ولی در بیشتر نقاط محل زمیندرز با ورق‌های رانده‌شده از شمال به جنوب پوشیده شده است. حد جنوبی البرز چندان روشن نیست، ولی به نظر می‌رسد که مرز شاخصی در مرز جنوبی البرز وجود نداشته باشد و گذر از پهنه ایران مرکزی به پهنه البرز تدریجی باشد [۲].

براساس نقشه لرزه‌زمین‌ساخت ایران در البرز زمین‌لرزه‌ها کم‌ترفا هستند، بعضی انواع متوسط نیز وجود دارند و البرز خاوری لرزه‌خیزتر از البرز باختری است [۹]. از آنجا که این منطقه از مناطق لرزه‌خیز بسیار فعال به شمار می‌رود، تحلیل خطر در این منطقه بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

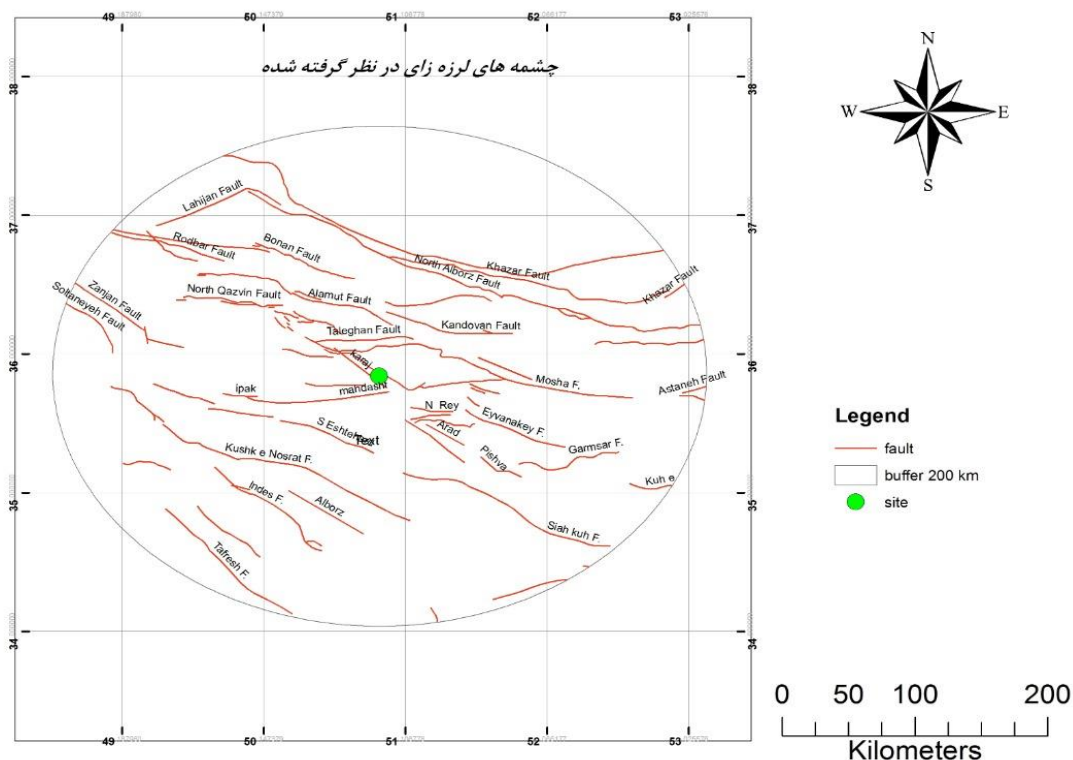
روش پژوهش

موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش

استان البرز در جنوب ارتفاعات البرز مرکزی واقع شده است که از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان مرکزی، از شرق به استان تهران و از غرب به استان قزوین منتهی می‌شود. استان البرز به مرکزیت شهر کرج است که روی نوار لرزه‌ای جنوب البرز واقع شده است. منطقه پژوهش شامل بخش خاوری البرز مرکزی محدوده استان تهران است. این بخش از نظر زمین‌ساختی جزء حاشیه شمالی صفحه ایران است. از دیدگاه لرزه‌زمین‌ساختی این منطقه کمر بند لرزه‌ای واقع در صفحه همگرایی ایران- توران است. استان البرز در خاور این ورقه جای دارد و راستای کلی بلندی‌های این منطقه خاوری- باختری است. براساس نقشه لرزه‌زمین‌ساخت ایران در البرز زمین‌لرزه‌ها کم‌ترفا هستند، بعضی انواع متوسط نیز وجود دارند و البرز خاوری لرزه‌خیزتر از البرز باختری است.

گسله‌های مهم منطقه

گسله‌های موجود در البرز اغلب از راستای چین‌خوردگی تبعیت می‌کنند و دارای سازوکار راندگی و حرکات امتدادلغز چپ‌بر هستند [۱۰]. در این پهنه تعداد گسله‌های دارای شیب به سمت دریای خزر با گسله‌های دارای شیب مخالف تقریباً برابر است [۵]؛ در صورتی که گسله‌های امتدادلغز بزرگ‌زاویه بیشتر به سمت دریای خزر شیب دارند. گسله‌های اصلی بخش شمالی به سمت جنوب و گسله‌های بخش جنوبی البرز، به طور معمول به سمت شمال شیب دارند [۱]. گسله‌های امتدادلغز در مجاورت این گسله‌ها با فلات ایران مرکزی، به طور معمول به بخش جنوبی البرز محدود شده‌اند. مؤلفه کوچک جابه‌جایی نرمال روی بعضی از گسله‌های راستالغز مشهود است. بیشتر گسله‌های بررسی شده در این رشته‌کوه از نظر لرزه‌زمین‌ساختی فعال و جنبه هستند. گسله‌های اصلی در محدوده پژوهش شامل گسله‌های شمال تهران، طالقان، ماهدشت، اشتهارد، ایوانکی، مشاء و ری است. در این پژوهش گسله‌های اصلی به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختگاه آورده شده است (شکل ۱).



شکل ۱. گسله های مهم به شعاع ۲۰۰ کیلومتری از منطقه پژوهش

لایه لرزه‌زا در منطقه پژوهش

تعیین عمق کانونی زمین لرزه‌ها موضوعی ضروری برای تفسیر درست لرزه‌خیزی در پژوهش‌های تکتونیک منطقه‌ای و برآورد خطر زمین لرزه است. اگرچه کاتالوگ‌های منتشرشده جهانی، به عنوان منابع عمومی اطلاعات درباره عمق‌های کانونی شناخته شده‌اند، ولی چنین اطلاعاتی با خطای بسیار زیادی همراه‌اند. مقایسه عمق‌های کانونی ارائه شده توسط مراکز لرزه‌نگاری مختلف چون ISC، NEIC و آنهايي که به روش برگردان امواج دورلرز محاسبه شده‌اند [۱۳، ۱۴، ۱۶] نشان می‌دهد که خطای موجود در عمق‌های ارائه شده در کاتالوگ‌های مراکز یادشده تا ۶۰ کیلومتر هم می‌رسد. بنابراین ملاحظه می‌شود که استفاده از چنین کاتالوگ‌هایی نمی‌تواند روش مناسب و دقیقی برای تعیین عمق رویدادهای لرزه‌ای منطقه پژوهش باشد.

در هر صورت برای برآورد خطر زمین لرزه، باید ژرفای کانونی همه زلزله‌های روی داده در گستره تحت مطالعه معلوم باشد. بدین منظور بررسی آماری ژرفای کانونی زلزله‌های گزارش شده می‌تواند توزیع آنها را در گستره تحت بررسی مشخص کند، ولی از آنجا که بسیاری از زمین لرزه‌های گزارش شده در گستره تحت بررسی، مکان‌یابی مجدد نشده‌اند نمی‌توان از آنها برای محاسبه لایه سایزموژنیک استفاده کرد. در نتیجه با توجه به پژوهش‌های مگی (۲۰۰۲)، عمق ۱۵ کیلومتر حداقل عمق برای رخداد زلزله‌ای در این پهنه در نظر گرفته می‌شود.

محاسبه بیشینه بزرگی (Mmax)

تخمین بیشینه بزرگی اغلب براساس ویژگی‌های کلی فعالیت لرزه‌ای و شباهت‌های زمین‌شناسی صورت می‌گیرد. در پژوهش‌های کاربردی Mmax اغلب براساس روابط تجربی بین بزرگی زمین لرزه و پارامترهای مختلف گسله مانند گسیختگی، مساحت سطح شکست، بیشینه جابه‌جایی سطحی و نرخ آزاد شدن ممان لرزه‌ای تخمین زده می‌شود. پژوهشگران روابط تجربی متعددی را برای بیان ارتباط بین این پارامترها و بزرگی زمین لرزه توسط منتشر کرده‌اند (جدول ۱) [۱، ۱۵]. در این پژوهش از روابط جدول ۱ برای محاسبه بیشینه بزرگی تجربی استفاده شد و بزرگای مشاهده‌ای برای گسله‌های مهم هر پهنه نیز مشخص شد (جدول ۲).

جدول ۱. انواع رابطه تجربی بین بزرگا و پارامترهای مختلف گسله

ردیف	پیشنهادکننده	رابطه تجربی ارائه شده
۱	Mohajer and Nowroozi (1978)	$M_s = 5.4 + \text{LogLR}$
۲	Zare (1995)	$M_w = 3.66 + 0.91 \text{LnLR}$
	طول گسل (km) L_f	بزرگای امواج سطحی M_s
	طول گسیختگی (km) L_R	بزرگای گشتاوری M_w

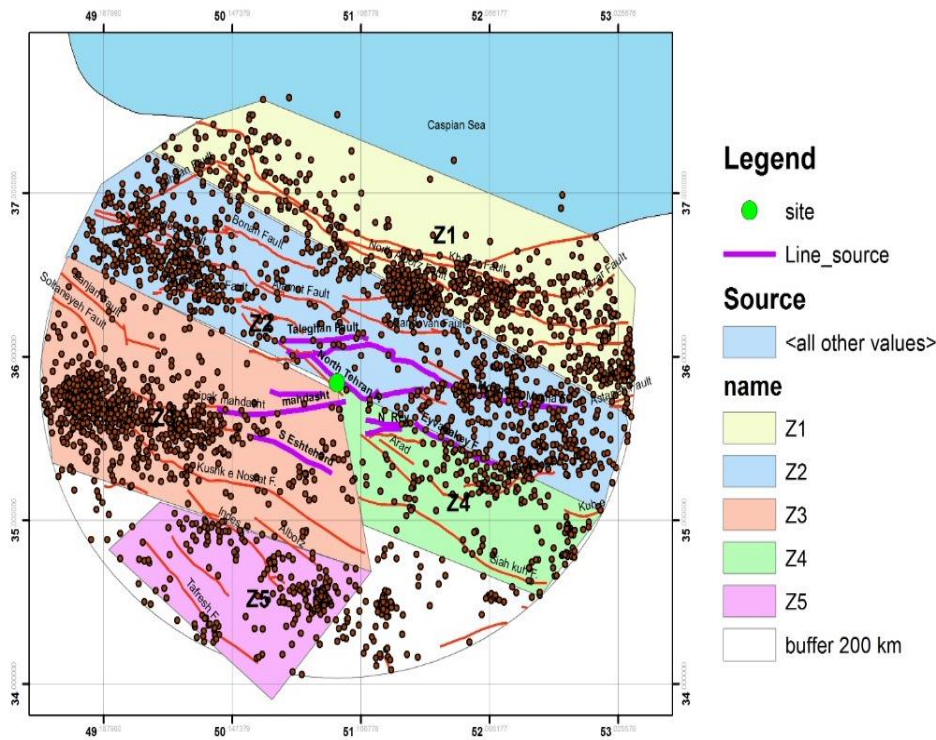
جدول ۲. محاسبه بیشینه بزرگی تجربی با استفاده از جدول ۱ و بزرگای مشاهده‌ای گسله‌ها

شماره	نام گسل	طول گسل	زارع (۱۹۹۵)		نوروزی و مهاجری (۱۹۷۸)		M_{max}	بزرگای مشاهده‌ای بزرگا
			$L_R * 0.37 = L_f$	M_w	$L = 0.5 * L_f$	M_w		
۱	شمال تهران	۹۰	۳۳/۳	۶/۹	۴۵	۷/۱	۷	۷/۲
۲	مشاء	۲۰۰	۷۴	۷/۶	۱۰۰	۷/۴	۷/۵	۷/۱
۳	ایپک	۱۰۰	۳۷	۶/۹	۵۰	۷/۱	۷	۷/۲
۴	طالقان	۶۴	۲۳/۶۸	۶/۵	۳۲	۶/۹	۶/۷	۵/۳
۵	الموترود	۱۰۰	۳۷	۶/۹	۵۰	۷/۱	۷	۷/۶
۶	بایجان	۴۵	۱۶/۶۵	۶/۲	۲۲/۵	۶/۸	۶/۵	۷
۷	شمال اشتهارد	۶۰	۲۲/۲	۶/۵	۳۰	۶/۹	۶/۷	۵/۳
۸	جنوب اشتهارد و ماهدشت	۸۰	۲۹/۶	۶/۷	۴۰	۷	۶/۸۵	-
۹	کندوان	۷۶	۲۸/۱۲	۶/۷	۳۸	۷	۶/۸۵	-
۱۰	لار	۲۵	۹/۲۵	۵/۷	۱۲/۵	۶/۵	۶/۱	۴/۵
۱۱	ایوانکی	۸۰	۲۹/۶	۶/۷	۴۰	۷	۶/۸۵	۷/۶
۱۲	کهریزک	۴۰	۱۴/۸	۶/۱	۲۰	۶/۷	۶/۴	-
۱۳	شمال ری	۱۶/۵	۶/۱۰۵	۵/۳	۸/۲۵	۶/۳	۵/۸	۷/۱
۱۴	جنوب ری	۱۸/۵	۶/۸۴۵	۵/۴	۹/۲۵	۶/۴	۵/۹	۷/۱
۱۵	گرمسار	۷۰	۲۵/۹	۶/۶	۳۵	۶/۹	۶/۷۵	۵/۴
۱۶	پیشوا	۳۴	۱۲/۵۸	۶	۱۷	۶/۶	۶/۳	-
۱۷	رباط کریم	۹۰	۳۳/۳	۶/۹	۴۵	۷/۱	۷	۴/۹

تعیین چشمه‌های بالقوه زمین لرزه

تحلیل خطر زمین لرزه مستلزم مدل کردن چشمه‌های زمین لرزه است. موقعیت چشمه به دلیل تضعیف انرژی امواج با فاصله حائز اهمیت است. در تحلیل خطر زمین لرزه در صورت بی‌دقتی و ناتوانی در مشخص کردن گسله به منزله چشمه لرزه‌زا، استفاده از ساخت متمرکز نسبت به استفاده از گسله‌های فعال، روش محافظه کارانه تری است. در این روش موقعیت چشمه‌های زمین لرزه‌ای به صورت چشمه‌های پهنه‌ای گسترده تر مطرح می‌شود.

مفهوم ساخت متمرکز دارای کاربرد عملی در تحلیل خطر زمین لرزه‌ها است و به کمک آن می‌توان چشمه لرزه زمین ساختی را بدون نیاز به شناخت دقیق جزئیات یا تعیین محل دقیق رویدادها تعیین کرد. با این حال در نواحی با لرزه‌خیزی کم، اغلب مشکلاتی وجود دارد که مهم‌ترین آنها در محیط‌های میان‌صفحه‌ای است که نظریه زمین ساختی کمک کمی در تعیین چشمه‌های لرزه زمین ساختی می‌کند. بدین ترتیب در سایت تحت بررسی با توجه به داده‌های زمین ساختی و لرزه‌شناسی، پنج پهنه لرزه‌زا به همراه هفت چشمه لرزه‌زای خطی تعیین شد (شکل ۲) [۶].



شکل ۲. پهنه‌های لرزه‌زا به همراه چشمه‌های لرزه‌زای خطی اطراف ساختگاه

برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

برای دستیابی به پارامترهای لرزه‌خیزی در گستره طرح در این تحقیق، از روش کیکو- سلوول (K-S) استفاده شد [۱۲]. تحلیل پارامترهای لرزه‌خیزی گستره طرح با استفاده از روش کیکو- سلوول برای پهنه‌های لرزه‌زا اطراف ساختگاه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌خیزی اطراف ساختگاه

Zone	Beta		Lambda for Mmin 4.0	Mmax	
z1	۱/۴۴	± ۰/۱۵	۱/۹۳۲	۷/۶	± ۰/۲
z2	۱/۶۹	± ۰/۱۴	۱/۸۸	۷	± ۰/۲
z3	۱/۷۴	± ۰/۲	۱/۰۱۰۸	۷	± ۰/۲
z4	۱/۷۱	± ۰/۳۰	۰/۸۹۸	۷/۴	± ۰/۲
z5	۱/۷۶	± ۰/۳۰	۱/۰۴۸	۶/۷	± ۰/۲
ماهدشت	۱/۷۴	± ۰/۲۲	۰/۲۴۶	۷	± ۰/۲
طالقان	۱/۶۹	± ۰/۲۲	۰/۱۹۶	۷	± ۰/۲
تهران شمال	۱/۶۹	± ۰/۲۲	۰/۲۷۶	۷	± ۰/۲
ری	۱/۷۱	± ۰/۲۲	۰/۰۵۷	۶/۲	± ۰/۲
ایوانکی	۱/۷۱	± ۰/۲۲	۰/۲۴۶	۷/۴	± ۰/۲
مشاء	۱/۶۹	± ۰/۲۲	۰/۶۱۴	۷/۴	± ۰/۲
اشتهارد	۱/۷۴	± ۰/۲۲	۰/۲۴۶	۷	± ۰/۲

تحلیل احتمالی خطر زلزله^۱

در ۲۰ تا ۳۰ سال گذشته استفاده از مفاهیم احتمالات سبب شده است که عدم قطعیت در اندازه، موقعیت و سرعت تکرار زلزله‌ها و همچنین در تغییرات مشخصات حرکت زمین با بزرگی و موقعیت زلزله به‌طور صریح در ارزیابی خطرات زلزله مدنظر قرار گیرد.

تحلیل احتمالی خطر زلزله چارچوبی ارائه می‌دهد که در آن عدم قطعیت‌ها را می‌توان شناسایی کرد و به‌صورت کمی درآورد و سپس در روندی منظم به‌گونه‌ای ترکیب کرد تا تصویر کامل‌تری از خطر زلزله ترسیم شود. این روش از جهت‌های زیادی مشابه روشی است که توسط کورنل (۱۹۶۸) و آلگرمیسنت (۱۹۸۲) به‌خوبی تبیین شده است [۸].

روابط کاهندگی

روابط کاهندگی بخشی مهم در تحلیل خطر لرزه‌ای به شمار می‌روند. علی‌رغم تلاش برای کنار گذاشتن اطلاعات مورد تردید و استفاده از اطلاعات کیفی و موزون، مقداری پراکندگی در اطلاعات اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. این پراکندگی ناشی از تصادفی بودن سازوکار شکست و همچنین به‌دلیل متغیر و چندگانه بودن منبع زلزله، مسیر و حرکت امواج زلزله و شرایط ساختمانی است. این پراکندگی اطلاعات حول مقدار میانگین، تأثیری مستقیم بر نتایج تحلیل خطر لرزه‌ای می‌گذارد؛ بنابراین به‌ناچار باید به‌نحو مناسبی وارد محاسبات شوند. روش معمول در کاهش پراکندگی اطلاعات، استفاده از انحراف معیار است [۱۷، ۱۸]. عدم قطعیت موجود در روابط کاهندگی را می‌توان به‌وسیله انحراف معیار مقادیر مورد نظر از مقدار میانگین وارد محاسبات احتمالی کرد. برای مثال با استفاده از رابطه کاهندگی مشخص، هرگاه فرض شود که محاسبه احتمال تجاوز پارامتر حرکت زمین Y از مقدار معلوم y در اثر زلزله‌ای با بزرگی m و فاصله r مدنظر باشد، محاسبه این پارامتر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$P[Y > y | M = m, R = r] = 1 - f_z(Z) \quad (1)$$

که در آن مقدار $f_z(Z)$ از یک طرف وابسته به مقدار انحراف معیار از میانگین در رابطه کاهندگی است و از سوی دیگر چگونگی توزیع احتمال پارامتر Z در محاسبه آن دخیل است. پارامتر Z را می‌توان با داشتن تفاضل مقدار حاصل از رابطه کاهندگی به ازای m و r (که معرف مقدار میانگین است) و مقدار مورد نظر که همان y است و نیز با مشخص بودن مقدار انحراف معیار موجود در رابطه کاهندگی محاسبه کرد:

$$Z = \frac{y - \bar{y}}{\delta} \quad (2)$$

که در آن $\bar{y} = f(m, r, C_i)$ و δ انحراف معیار رابطه کاهندگی است. با مشخص بودن چگونگی توزیع احتمال پارامتر Z ، می‌توان مقدار تابع توزیع احتمال و در نتیجه احتمال مورد نیاز را محاسبه کرد. به‌طور کلی چنین فرض می‌شود که پارامترهای حرکت زمین توزیع لگاریتمی نرمال دارند، یعنی لگاریتم پارامتر مربوط، دارای توزیع نرمال است. با استفاده از چنین فرضی می‌توان از روابط کاهندگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در آنها در محاسبات مربوط به تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده کرد.

روابط کاهندگی انتخاب‌شده

انتخاب روابط کاهندگی مناسب از اهمیت بسزایی در چگونگی و قابلیت اعتماد نتایج نهایی تحلیل خطر برخوردار است. بدین منظور در پژوهش حاضر از سه رابطه کاهندگی مختلف برای محاسبات استفاده شده و پس از مقایسه نتایج هر کدام از روابط بالا با اعمال یک درخت منطقی و نسبت دادن وزن‌های مناسب برای هر کدام از روابط، نتایج نهایی جمع‌بندی شده است. این روابط کاهندگی عبارت‌اند از:

۱. رابطه کاهندگی ایران زارع (۱۹۹۹)

$$\log A = aM + bX + C_i S_i + (\sigma)p \quad [3, 4] \text{ مدل کاهندگی} \quad (3)$$

M: Magnitude (Mw)

X: Hypocentral Distance, $X^2 = D^2 + H^2$ (ژرفای کانونی=H)

C_i : Site Class (C_1 : Rock, C_2 : Hard Alluvium, C_3 : Soft Alluvium,

C_4 : 0,1, P: 0,1 S_i : Soft Soil),

انحراف معیار مطابق جدول با قرار دادن $p=1$ به میانگین مقدار در حالت $p=0$ اضافه است.

۲. رابطه کاهندگی آمبرسیز (۱۹۹۵)

$$\log a = A + BM_S + Cr + D \log r \quad [V] \quad (۴)$$

$$r^2 = d^2 + h_0^2$$

a is in g , for $4.0 \leq M \leq 7.4$:

for horizontal PGA not including focal depth

$$A = -1.09, B = 0.238, C = -0.00050, D = -1, h_0 = 6.0 \text{ and } \sigma = 0.28,$$

not including focal depth for vertical PGA

$$A = -1.34, B = 0.230, C = 0, D = -1, h_0 = 6.0 \text{ and } \sigma = 0.27,$$

for horizontal PGA including focal depth

$$A = -0.87, B = 0.217, C = -0.00117, D = -1, h_0 = h \text{ and } \sigma = 0.26$$

and for vertical PGA including focal depth

$$A = -1.10, B = 0.200, C = -0.00015, D = -1, h_0 = h \text{ and } \sigma = 0.26.$$

۳. رابطه کاهندگی جویئر، بور و فومال (۱۹۸۱)

$$\ln Y = b_1 + b_2(M-6) + b_3(M-6)^2 + b_5 \ln r + b_7 \ln (V_S / V_A) \quad [۱۱] \quad (۵)$$

$$r = \text{sqrt}(r_{jb}^2 + h^2)$$

$$b_1 = b_{1SS} \quad \text{for strike-slip earthquakes}$$

$$b_{1RS} \quad \text{for reverse-slip earthquakes}$$

$$b_{1ALL} \quad \text{if mechanism is not specified}$$

Y is the ground motion parameter (PGA, SA) in g

M is moment magnitude

r_{jb} is closest horizontal distance (km) to the vertical projection of the rupture

V_S is the average shear wave velocity to 30 m, in m/sec

محاسبه سطوح مختلف خطر احتمالی

محاسبات تحلیل احتمالی خطر زلزله با استفاده از روش ارائه شده در مقاله گرین و هال (۱۹۹۴) انجام گرفته است. در جدول‌های ۴ تا ۸، نتایج تحلیل احتمالی خطر برای بیشینه شتاب افقی و قائم بر روی سنگ بستر لرزه‌ای با استفاده از روابط کاهندگی ارائه شده، نتایج نهایی حاصل از ترکیب نتایج روابط کاهندگی و همچنین درخت منطق ارائه شده است.

نتایج حاصل از رابطه کاهندگی زارع (۱۹۹۹)

نتایج در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج برای ترکیب چشمه‌های لرزه‌زا با دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال و میرایی ۵ درصد انجام گرفته است.

جدول ۴. نتایج بیشینه شتاب افقی

دوره بازگشت	نتیجه کل برحسب g
۴۷۵	۰/۴۷
۲۴۷۵	۰/۸۵

جدول ۵. نتایج بیشینه شتاب قائم

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۲۹	۴۷۵
۰/۵۳	۲۴۷۵

نتایج حاصل از رابطه کاهندگی جویبر، بور و فومال (۱۹۸۱)

نتایج حاصل از رابطه کاهندگی جویبر، بور و فومال در جدول ۶ آورده شده است. نتایج برای ترکیب چشمه‌های لرزه‌زا با دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ انجام گرفته است.

جدول ۶. نتایج بیشینه شتاب افقی

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۳۸	۴۷۵
۰/۵۶	۲۴۷۵

نتایج حاصل از رابطه کاهندگی آمبرسیز (۱۹۹۶)

نتایج حاصل از رابطه کاهندگی آمبرسیز در جدول‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. نتایج برای ترکیب چشمه‌های لرزه‌زا با دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال صورت گرفته است.

جدول ۷. نتایج بیشینه شتاب افقی

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۳۶	۴۷۵
۰/۵۳	۲۴۷۵

جدول ۸. نتایج بیشینه شتاب قائم

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۱۸	۴۷۵
۰/۳۰	۲۴۷۵

نتایج حاصل از ترکیب روابط کاهندگی

نتایج تحلیل خطر حاصل از روابط کاهندگی فوق با اعمال روش درخت منطق ترکیب شدند که در نتیجه مقادیر جدول‌های ۹ و ۱۰ حاصل شد. ضرایب هر کدام از روابط کاهندگی برای اعمال درخت منطقی عبارت‌اند از:

مؤلفه افقی: زارع (۱۹۹۹): ۰/۵، بور (۱۹۸۱): ۰/۲۵ و آمبرسیز (۱۹۹۶): ۰/۲۵
مؤلفه قائم: زارع (۱۹۹۹): ۰/۶، آمبرسیز (۱۹۹۶): ۰/۴

جدول ۹. نتایج بیشینه شتاب افقی

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۴۲	۴۷۵
۰/۷۰	۲۴۷۵

جدول ۱۰. نتایج بیشینه شتاب قائم

نتیجه کل برحسب g	دوره بازگشت
۰/۲۵	۴۷۵
۰/۴۴	۲۴۷۵

نتیجه گیری

زمین لرزه اخیر ملارد با بزرگای ۵/۲ و وقوع چند زلزله با بزرگای بیش از ۴ اهمیت پژوهش‌های لرزه‌خیزی در منطقه را چندبرابر کرد. یکی از مهم‌ترین پژوهش‌های مقدماتی در ساخت‌وساز شهری برای جلوگیری از آسیب‌پذیری لرزه‌ای، مطالعه خطر زمین‌لرزه است. شناسایی پهنه‌های چشمه‌های لرزه‌ای ارتباط تنگاتنگ با زیرساخت‌های توسعه هر منطقه دارد. این نتایج در پروژه‌های مهم و حیاتی از جمله خطوط انتقال آب، گاز، نفت، احداث سد و فرودگاه و توسعه مناطق مسکونی کاربرد وسیع دارد و بی‌توجهی به آن ممکن است خسارات زیادی در پی داشته باشد. تحلیل خطر زمین‌لرزه نیز چنانچه برپایه شناخت دقیق موقعیت این پهنه‌ها استوار شده باشد، بی‌شک نتایج اطمینان‌بخش‌تری را در بر خواهد داشت. مطالعه منطقه مدنظر، سابقه لرزه‌خیزی در گذشته و ثبت زمین‌لرزه‌های اخیر در منطقه حاکی از فعالیت منطقه از لحاظ لرزه‌خیزی است. با توجه به عمق کم زمین‌لرزه‌ها می‌بینیم که در این منطقه شدت زمین‌لرزه‌ها زیاد است. در ضمن محاسبه پارامترهای λ و β منطقه که بین بزرگای ۷/۶ و ۶/۲ است نشان‌دهنده لرزه‌خیزی منطقه است؛ بر این اساس رعایت کامل نکات ایمنی در ساخت‌وسازهای منطقه توصیه می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد با توجه به تحرکات اخیر در منطقه و زلزله‌های صورت‌گرفته، اهمیت بررسی زمین‌لرزه در این ناحیه و همچنین تقویت ایستگاه‌های لرزه‌خیزی یکی از اقدامات لازم است. همچنین با بررسی کاتالوگ لرزه‌ای مشخص شد که منطقه تحت بررسی طی چند دهه گذشته فعالیت خاصی ندارد و به‌یکباره فعال شده که موضوع بسیار مهمی است. معرفی مدل جدید لرزه‌زمین‌ساختی منطقه استان البرز و ارائه بیشینه توان لرزه‌ای چشمه‌های لرزه‌زا برای این استان از نوآوری‌های این پژوهش است. همچنین محاسبات بیشینه شتاب افقی و قائم زمین با استفاده از روابط استفاده‌شده به شرح زیر است که حاکی از شدت خطر زمین‌لرزه در منطقه است که باید در محاسبات مربوط به سازه‌های مهم در نظر گرفته شود.

شتاب بیشینه افقی روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال = ۰/۴۲g

شتاب بیشینه افقی روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال = ۰/۷۰g

شتاب بیشینه قائم روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال = ۰/۲۵g

شتاب بیشینه قائم روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال = ۰/۴۴g

تشکر

این مقاله مستخرج از رساله دکتری است که با حمایت گروه ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال فراهم شده است. از اعضای هیأت علمی این گروه و همچنین دانشگاه قدردانی می‌شود.

منابع

- بربریان، مانوئل؛ قریشی، منوچهر؛ طالبیان، مرتضی؛ و شجاع طاهری، جعفر (۱۳۷۵). پژوهش و بررسی نوزمین ساخت و خطر زمین لرزه گسلش در گستره سمنان. سازمان زمین شناسی کشور.
- درویش زاده، علی (۱۳۷۰). زمین شناسی ایران. تهران. نشر دانش امروز.
- زارع، مهدی (۱۳۷۴). رابطه های مناسب بزرگا، شدت و بیشینه شتاب افقی براساس زمین لرزه های ایران. پژوهشنامه مؤسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- زارع، مهدی (۱۳۸۲). مقدمه ای بر زلزله شناسی کاربردی. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- نبوی، محمدحسن (۱۳۵۵). دیباچه ای بر زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی ایران.
- Alavi, M. (1991). Tectonic map of the middle east, Geological Survey of Iran.
- Ambraseys, N. N., & Mellville, C. P. (1982) *A History of Persian Earthquakes*, Camb. Earth Sci. Ser.
- Ambraseys, N.N. (1995). The prediction of earthquake peak ground motion acceleration in Europe. *Earthquake Engineering and structural Dynamic*, 24(c).
- Berberian, M. (1976). Contribution to the Seismotectonics of Iran, Geol. Sur. Iran (1976).
- Jackson, J. & Mckenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpien– Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan, *Geophysics. J.R. Soc.* 77, (1984).
- Joyner, W.B. & Boore, D.M. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Kijko, A. & Sellevoll, M.A. (1992) Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 82,120-134.
- Maggi, A. A. (2000). re-assessment of focal depth distribution in southern Iran, the Tien shan and northern India: of earthquakes really occur in the continental mantle Geophys.
- Maggi, A. (2002). Focal Depths of Moderate and Large Size Earthquakes in Iran, *JSEE*, 4(2&3).
- Nowroozi, A.A. & Mohajer-Ashjai, A. (1985). Fault movements and tectonics of Eastern Iran: boundaries of the Lut plate. *Geophys. J. R. astr. Soc.*,83.
- Priestley, K., Baker, C., & Jackson, J. (1994). Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the south Caspian basin and surrounding regions: *Geophysical Journal International*, 118.
- Zare, M. (1999). Contribution a letude des mouvements forts en Iran: du Catalogue aux lois dattenuation, These de Doctorat (PhD Thesis), Universite Joseph Fourier, Gemoble, France.
- Zare, M. (2004). Strong motion data of the 1994-2002 earthquakes in Iran: a catalogue of 100 selected records with higher qualities in the low frequencies, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 6(2), 1-17.