

Seismotectonic and seismic hazard analysis in Dezful and Susa cities

Abbas Charchi^{1*}, Seyyed Sajedin Mousavi¹, Behzad Shahabadi¹

1-Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: Seismotectonic, Probabilistic seismic hazard analysis, Dezful, Susa, Design base earthquake

1-Introdoction

The construction of earthquake-resistant engineering projects and the stability evaluation for existing buildings are a crucial issue in seismic areas. The response of constructions and their damages depend on source parameters and distance to rupture, amplitude, duration, the spectral content of vibration and local conditions of the site (soil conditions, topography, etc.; Jorjiashvili et al., 2016; Ashayeri et al., 2018). An earthquake not only destructs directly critical structures by generating the seismic waves, but also leads to geohazards such as liquefaction, settlement, sand boiling, and the turbidity of spring and well waters. In such seismically active regions, the seismic hazard analysis is inevitable. The process of assessing the design parameters of seismic ground motion is called seismic hazard analysis. Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is one of the most practical approaches for quantify uncertainties about future earthquake parameters and combine them to produce an explicit description of the distribution of future shaking that may occur at a site (Backer, 2013). The method is based on the rate of a past earthquake determined from the earthquake catalog.

Dezful and Shush cities are historical and second population areas in Khuzestan province. On the other hand, the presence of different faults in the region demonstrates the necessity for seismic study and risk assessment of this area. This research focuses on seismotectonic setting and seismic risk analysis of Dezful and Susa cities using the probabilistic method for 50 km radius.

2- Research methods

In order to assess seismic hazards for a particular region, all possible sources of seismic activity must be recognized. For these purposes, geological investigations, and recognition of faults, as well as their geometry in the study area carried out. In this paper, the seismic sources were identified as line sources based on geological and seismotectonic investigations for the study area. Moreover, the seismic background of these cities evaluated. The primary seismic sources in the region are faults such as Lahbari, Dezful, Cheshmeh Khosh, Pir Ahmad, and Balarud fault zone as well as NS1 and NS2 basement faults. Also, all instrumented earthquakes were gathered in the region covering a radius of 50 km keeping Dezful city as the center from the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Iranian Seismological Center (ISC), and the United States Geological Survey (USGS). In the next step, the maximum credible earthquake (MCE) and design base earthquake (DBE) (for the various hazard levels measured. Finally, peak ground acceleration of the area for the hazard levels of 10 and 64% exceedance probability within 50 years calculated. Then, hazard maps of peak ground accelerations were delineated for the selected area.

3-Results and discussion

Probabilistic seismic hazard analysis helps to the safety of critical structures, and optimum siting and designing of new projects in these cities. The earthquakes of 128 with a magnitude greater than 4 Richter taken place at study area in 1965–2018. Moreover, the maximum frequency percent was

* Corresponding author: charchi38@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2019.28986.1963

Received 2019-04-06

Accepted 2019-06-13

24.39 and occurred in 1974-1982 — the ground motion parameters estimated by probabilistic seismic hazard analysis in different probability. For return periods of 25, 50, 100, and 200 years, results show that the maximum magnitude of design base earthquake (DBE) is 5.4, 5.6, 5.9, 6.1 Richter, respectively (Table 1). For Dezful city, the maximum acceleration of design base earthquake and maximum credible earthquake calculate 0.22 and 0.33g, respectively, using Donovan equation. Also, these parameters, for Susa city, estimate equal to 0.24 and 0.36g (Table 2). The seismic zonation maps revealed that the highest risk of the area located in middle and northern parts.

Table 1. The result of computation of peak ground acceleration for Dezful and Susa cities during a 50-year return period according to Donovan's (1973) formula.

Fault name	Distance to Dezful (km)	Distance to Susa (km)	Magnitude (Rikhter)			Acceleration (g)					
						0.64		0.37		0.10	
			0.64	0.37	0.10	Dezful	Susa	Dezful	Susa	Dezful	Susa
Dezful	2.9	28.8	5.6	5.9	6.4	0.22	0.09	0.26	0.11	0.33	0.14
Balarud	62.5	44.1				0.05	0.07	0.06	0.08	0.07	0.10
Cheshmeh Khosh	48	24.3				0.06	0.10	0.07	0.12	0.06	0.16
Pir Ahmad	26	47				0.10	0.06	0.12	0.07	0.15	0.09
Basement fault NS1	43.3	57.6				0.07	0.05	0.08	0.06	0.10	0.08
Basement fault NS2	14.1	1.2				0.14	0.24	0.17	0.27	0.21	0.36
Lahbari segment 5	32.93	51.2				0.08	0.06	0.10	0.07	0.13	0.06
Lahbari segment 6	32.22	50.04				0.09	0.06	0.10	0.07	0.13	0.06
Lahbari segment 7	32.2	44.1				0.11	0.07	0.13	0.08	0.16	0.10

4-Conclusion

Planning and developing of construction in big cities and the vicinity regions demonstrate the necessity for urban engineering geology study and identifying geohazards in particular seismic risk. The Probabilistic seismic hazard analysis is an effective method for mitigating seismic hazards during probable future earthquakes. According to the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology classification for seismic acceleration, results show that these cities located in very high class for the acceleration of maximum credible earthquake. Whereas, for the design base earthquake (DBE), Dezful and Susa cities fall in the medium class. Results of the seismic study lead to protect lives and decrease economic risks when a probable earthquake occurs in the study area. Therefore, it is necessary to retrofit the historical and worn-out urban structures.

References

- Ashayeri, I., M. Biglari, M., Shamoradi, S. B., and Rashidi Gouya, H., 2018. Probabilistic seismic hazard Assessment and geotechnical seismic micro-zonation of Kangavar with ambient vibration and electrical resistivity analysis. *AUT Journal of Civil Engineering* 2 (1), 29-38.
- Baker, J.W., 2013. Probabilistic seismic hazard analysis. White paper, 79p.
- Berberian, M., 1995. Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241, 193-224.
- Alavi, A., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science* 307, 1064–1095
- Donovan, N.C., 1973. San Fernando earthquake. *Proceeding of 5th World Conference Earthquake Engineering*, Vol. 2, 1252-1261.

- Gillard, D., Wyss, M., 1995. Comparison of strain and stress tensor orientation: application to Iran and southern California. *Journal of Geophysical Research* 100 (B11), 22197-22213.
- Grunthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D., 2018. The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineerin*. Doi:/10.1007/s10518-018-0315-y.
- Jorjiashvili, N., Elashvili, M., Gigiberia, M., Shengelia, I., 2016. Seismic hazard analysis of Adjara region in Georgia. *Natural Hazards* 81, 745–758.
- Kijko, A., 2011. Introduction to probabilistic seismic hazard analysis. In: *Encyclopedia of solid earth geophysics*; Gupta, H. (ed), Springer, Germany.
- Macleod, J.H., Thompson, J.H., Sahabi, F., 1970. Geological map of Shahbazan (scale 1:100000). Iranian Oil Operating Companies.
- Mansoori Bidgani, F., 2018. Siesmotectonic analysis of the Lahbari fault. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz.
- Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y.T., 1998. Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces. *Journal of Earthquake Prediction Research* 7, 465 - 495.
- Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M., and Péquegnat, C., 2014. Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran). *Geological Society* 330, 5-18.
- Perry, J.T.O'B., Setudehnia, A., 1967. Geological map of Dezful (1:100000 scale). Iranian Oil Operating Companies.
- Perry, J.T.O'B., Setudehnia, A., 1967. Geological map of Shushtar (scale 1:100000). Iranian Oil Operating Companies.
- Sahabi, F., Macleod, J.H., 1970. Geological map of Balarud (scale 1:100000). Iranian Oil Operating Companies.
- Yoosefi, E., 1994. Magnetic basement map of Iran (scale 1:2500000). Geological survey & mineral exploration of Iran, Tehran.
- Yoosefi, E., 1994. Magnetic linement map of Iran (scale 1:2500000). Geological survey & mineral exploration of Iran, Tehran.

تحلیل لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زلزله در محدوده شهرهای دزفول و شوش

عباس چرچی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

سید ساجدین موسوی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

بهزاد شاه‌آبادی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷

*Charchi38@scu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق وضعیت لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل خطر زمین‌لرزه شهرستان‌های دزفول و شوش تا شعاع ۵۰ کیلومتری مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع می‌تواند به ایمن‌سازی سازه‌های مهم و حیاتی و مکان‌یابی مناسب تاسیسات و سازه‌های جدید در سطح این شهرستان‌ها کمک کند. به همین دلیل در این تحقیق با بررسی شرایط زمین‌شناسی منطقه اقدام به شناسایی گسل‌های محدوده مطالعاتی و تعیین ابعاد و هندسه آنها شده است. همچنین، پیشینه لرزه‌خیزی این منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مقاله برآورد پارامترهای جنبش زمین به روش آماری-احتمالاتی و در سطوح احتمال وقوع مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه بزرگی زلزله مبنای طرح (احتمال ۶۴ درصد) برای دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله در این منطقه به ترتیب ۵/۴، ۵/۶، ۵/۹ و ۶/۱ ریشتر برآورد شده است. نتایج حاصل از رابطه میرایی دانووان موید آن است که بیشینه شتاب قابل انتظار و مبنای طرح برای شهر دزفول به ترتیب ۰/۲۲ g و ۰/۳۳ g است. این مقدار برای شهر شوش به ترتیب ۰/۲۴ g و ۰/۳۶ g است. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده مبین آن است که بخش‌های شمالی و میانی گستره مورد مطالعه از بیشترین خطر برخوردار می‌باشند. بنابراین، باید نسبت به مقاوم‌سازی و تقویت بافت‌های فرسوده و تاریخی اقدام نمود.

کلمات کلیدی: لرزه‌زمین‌ساخت، تحلیل احتمالاتی خطر زلزله، دزفول، شوش، زلزله مبنای طرح

(Probabilistic Seismic Hazard Analysis) تعیین احتمال وقوع زلزله-

های با بزرگی‌های متفاوت و در فواصل مختلف از محل مورد نظر است (Kijko, 2011). بنابراین، برنامه توسعه شهرها و شناسایی پهنه‌های پرخطر در این مناطق نیازمند تحلیل خطر زلزله به این روش است تا از طراحی‌های دست بالا و خسارات احتمالی در آینده جلوگیری به عمل آید.

محدوده شهرهای دزفول و شوش به عنوان دومین قطب جمعیتی استان خوزستان نقش مهمی را در صنعت، کشاورزی و گردشگری این استان ایفا می‌نمایند. همچنین، حضور دو اثر جهانی ثبت شده در یونسکو به نام‌های معبد چغازنبیل و قلعه شوش و نیز وجود آثار تاریخی و باستانی متعدد در شهر دزفول و اطراف آن مانند پل و بازار قدیم آن و دیگر بناها بر ضرورت توجه به پتانسیل لرزه‌خیزی این منطقه افزوده است.

با این وجود، عمده مطالعات لرزه‌خیزی انجام شده در منطقه مربوط به سدهای دز و بالارود بوده و خطر وقوع زلزله در مراکز شهری و جمعیتی این منطقه کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است میزان خطر زلزله در این ناحیه مورد ارزیابی و سنجش قرار گیرد تا بتوان به برنامه‌های آتی توسعه صنعتی و شهری در این ناحیه و بهسازی بافت‌های تاریخی و فرسوده کمک کرد.

زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس چین‌خورده و زیرپهنه فروبار دزفول قرار واقع شده است (شکل ۱). فروافتادگی دزفول به صورت ساختاری خلیج مانند است که از شمال توسط گسل بالارود، از شرق و جنوب توسط خطواره کازرون - برازجان و در شمال غرب با گسل پیشانی کوهستان احاطه شده است.

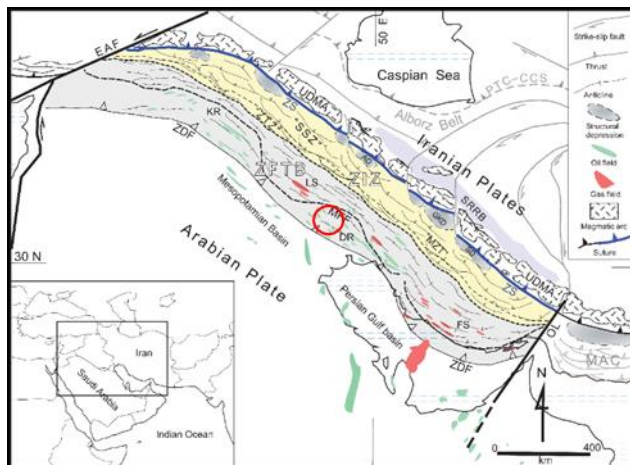
مقدمه

طراحی سازه‌های ایمن در برابر زلزله و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود یکی از چالش‌های مدیریت شهری در مناطق لرزه‌خیز است. پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله و میزان خسارت آنها تحت تأثیر ویژگی‌های چشمه لرزه‌زا، فاصله از سطح گسیختگی، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و هندسه لایه‌های سنگ و خاک محل، مشخصات امواج و دوره تناوب زلزله است (Jorjashvili et al., 2016; Ashayeri et al., 2018). زلزله نه تنها مستقیماً با تولید امواج لرزه‌ای و ارتعاشات به سازه‌ها و شریان‌های حیاتی شهرها آسیب وارد می‌کند، بلکه وقوع مخاطرات زمین‌شناسی دیگری نظیر روانگرایی، زمین‌لغزش، فرونشست و ماسه-زایی و کدر شدن چشمه‌ها و چاه‌ها و غیره را نیز تحریک می‌کند.

در چنین مناطقی، تحلیل خطر زلزله یکی از پیش‌نیازهای اساسی طراحی است. تحلیل خطر زلزله (Seismic Hazard Analysis) فرآیند پیش‌بینی و تخمین زلزله و پارامترهای آن در یک منطقه خاص است. پیش‌بینی زلزله‌های احتمالی در آینده با عدم قطعیت‌های زیادی در زمینه محل، اندازه و شدت لرزش-های ایجاد شده مواجه است. روش احتمالاتی یکی از پرکاربردترین رویکردها برای کمی کردن این عدم قطعیت‌ها جهت ارائه توصیفی روشن از توزیع زلزله-های احتمالی در یک محل معین می‌باشد (Backer, 2013). این روش که مبتنی بر آمار و فراوانی زلزله‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه است، تخمین بارهای دینامیکی ناشی از زلزله به سازه‌های مهندسی را نیز تسهیل می‌کند (Grunthal et al., 2018). در واقع، روش احتمالاتی تحلیل خطر زلزله

مزوزئیک و سنوزئیک هستند. با این وجود، حضور پهنه گسلی بالارود در این منطقه موجب شده است تا برخی از ساختارهای چین خورده منطقه مانند تاقدیس‌های لب سفید، خوشاب، قلعه نار و کاسه ماست روند شرقی- غربی پیدا کنند.

فرونشست قائم این حوضه از زمان میوسن- پلیوسن بیش از ۳ کیلومتر بوده است و سازندهای موجود در این پهنه نسبت به سنگ‌های واقع در شمال آن کمتر چین خورده‌اند (Berberian, 1995). در این منطقه روند عمده تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها شمال غرب - جنوب شرق است که عمدتاً متشکل از رخنمون‌های

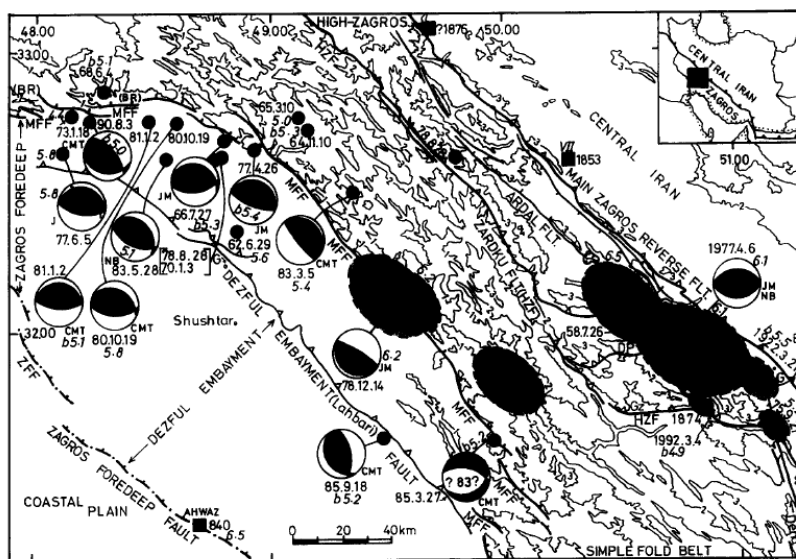


شکل ۱- جایگاه زمین ساختی زاگرس و زیرپهنه فروبار دزفول (Alavi, 2007). موقعیت محدوده مورد مطالعه با علامت دایره مشخص شده است.

Fig. 1. Tectonic situation of Zagros and Dezful embayment subzone (Alavi, 2007). The location of the study area is presented by the circle.

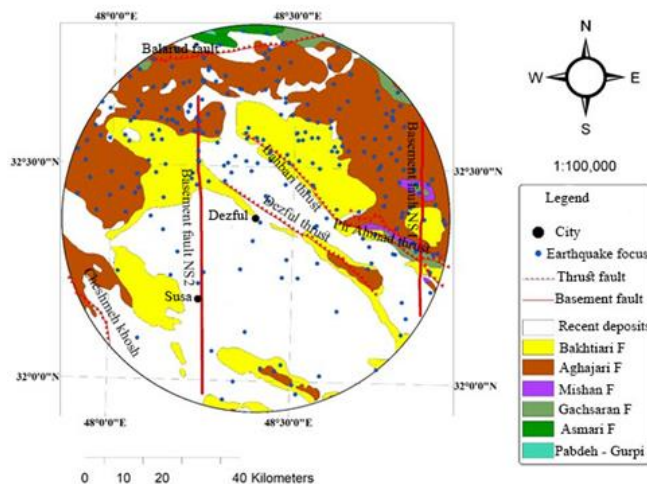
راندگی پنهان و گسله‌های عرضی- برشی در پی سنگ منطقه باشد (Berberian, 1995). مطابق نقشه پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی Mirzaei و همکاران (۱۹۹۸) این منطقه در ایالت زاگرس شمال‌باختر قرار می‌گیرد. هم‌چنین، بر اساس نقشه پی‌سنگ مغناطیسی ایران (یوسفی، ۱۳۷۳) عمق پی- سنگ در محدوده مورد مطالعه ۱۳ کیلومتر است. در منطقه عمق ناپیوستگی موهو نیز ۴۴ کیلومتر است (Paul, et al., 2014). در محدوده مورد بررسی نهشته‌های سازند گورپی، پابده، آسماری، گچساران، میشان، آغاچاری، بختیاری و رسوبات کواترنر رخنمون دارند (شکل ۳).

باز شدن دریای سرخ از زمان اتوسن و فشارش سپر عربستان عامل اصلی دگربختی و زلزله‌های این منطقه است. مطالعات انجام شده موید آن است که راستای تنش اصلی حداکثر در این منطقه ۲۱۶ درجه و تقریباً افقی است (Gillard and Wyss, 1995). ساز و کار غالب زمین لرزه‌ها از نوع رانده و راستالغز راستگرد می‌باشد (شکل ۲). از دیدگاه لرزه‌خیزی، اکثر زلزله‌های این منطقه از نوع سطحی و کم عمق بوده و زلزله‌های بزرگ با گسلس سطحی همراه نیستند. هم‌چنین، بین توزیع مراکز برخی از زلزله‌ها و اثرات سطحی گسل‌ها ارتباط کاملی وجود ندارد که این موضوع می‌تواند ناشی از حضور گسل‌های



شکل ۲- نقشه لرزه‌زمین‌ساختی از محدوده مطالعاتی (Beberian, 1995).

Fig. 2. Siesmotectonic map of the study area (Beberian, 1995).



شکل ۳- نقشه چینه‌شناسی محدوده مورد مطالعه (با اقتباس از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بالارود، شهیازان، شوشتر و دزفول).

Fig. 3. Stratigraphic map of the study area (extracted from geological maps at 1:100000 scale of Bala rud, Shahbazan, Shushtar and Dezfoul).

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی خطر زلزله در منطقه مطالعاتی نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای منطقه، گزارشات زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی پروژه‌های عمرانی اجرا شده در این منطقه جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفت. این مرحله در شناسایی گسل‌ها و چشمه‌های لرزه‌زا و فاصله آنها از مراکز جمعیتی منطقه مورد مطالعه بسیار حائز اهمیت است. هم‌چنین، به منظور آگاهی از پتانسیل لرزه‌خیزی منطقه زلزله‌های باستانی و تاریخی و نیز زلزله‌های دستگاهی در منطقه‌ای به شعاع ۵۰ کیلومتر و به مرکزیت شهر دزفول مورد بررسی قرار گرفتند. آمار زلزله‌های دستگاهی از پژوهشگاه مهندسی زلزله و زلزله شناسی ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و سازمان زمین شناسی آمریکا اخذ گردید. با شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا از طریق توزیع مراکز زلزله‌های رخ داده و مطالعات صحرایی، بزرگی زلزله‌های احتمالی در سطوح خطر مختلف به روش احتمالاتی برآورد شد. در نهایت با به‌کارگیری رابطه کاهندگی Donovan (۱۹۷۳) شتاب زلزله احتمالی در منطقه محاسبه شد و نقشه هم شتاب برای این محدوده در سطوح خطر مختلف ارائه گردید.

بررسی چشمه‌های لرزه‌زا منطقه مطالعاتی

گام اول در ارزیابی خطر زلزله در هر منطقه آگاهی از شرایط زمین‌شناسی و شناخت گسل‌های فعال است که به شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا در منطقه می‌انجامد. به همین منظور با استفاده از مطالعه تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی و انجام بازدیدهای صحرایی نوع گسل‌های منطقه و ویژگی‌های هندسی آنها مشخص گردید که مهمترین آنها عبارتند از:

گسل فروبار (راندگی) دزفول

این گسل که مرز شمال شهر دزفول است، بین گسل پیشانی و گسل پیشانی کوهستان قرار گرفته است. براساس شواهد زمین‌شناسی و ارتفاع کلی سازند گچساران، جایجایی قائم این گسل از زمان فعالیت خود در حدود ۳۰۰ متر برآورد می‌شود (Berberian, 1995). به نظر می‌رسد دو زمین‌لرزه ۱۹۷۷/۶/۵

($m_s=5/8$) و ($m_b=5/2$) ۱۹۸۵/۰۹/۱۸، با ساز و کار راندگی ناشی از فعالیت این گسل باشد.

راندگی لهری

این گسل با امتداد شمال غرب - جنوب شرقی و شیب شمال شرقی سازند گچساران را بر روی سازندهای آغاچاری و میشان رانده است (شکل ۴). این گسل قاشقی طولی در حدود ۱۵۰ کیلومتر دارد. منصوری (۱۳۹۷) با استفاده از تغییرات هندسه گسل آنرا به هفت قطعه تقسیم کرده است که قطعات ۵، ۶ و ۷ آن در محدوده مطالعاتی قرار دارند. این راندگی از فاصله تقریبی ۱۶ کیلومتری شرق دزفول عبور می‌کند. یال جنوب غربی ناقدیس‌های موجود در کنار راندگی لهری همگی برگشته‌اند. زلزله‌های سال‌های ۱۹۴۰، ۱۹۶۹، ۱۹۷۸، ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ به ترتیب با بزرگی ۶، ۵/۲، ۵/۸، ۶/۵ و ۵/۲ منتسب به فعالیت این گسل است.

راندگی چشمه‌خوش

راندگی چشمه خوش ادامه شمال غربی راندگی میشداغ بوده و با روند شمال غربی-جنوب شرقی در غرب شهرستان شوش قرار دارد. راندگی چشمه خوش دارای درازای ۵۰ کیلومتر است و در راستای آن سازند آغاچاری بر روی آبرفت‌های کواترنری رانده شده است.

راندگی پیراحمد

راندگی پیراحمد طولی در حدود ۳۰ کیلومتر و روند شمال غرب - جنوب شرق دارد. شیب این راندگی به سوی شمال شرق است. در راستای این راندگی سازند گچساران با شیبی ملایم بر روی سازندهای آغاچاری- لهری و بختیاری و آبرفت کواترنری رانده شده است.

این راندگی دارای خط گسلی واضحی نیست، زیرا سازند تبخیری گچساران حالت شکل‌پذیر دارد. پیچ و خم زیاد پیشانی کوهستان در محلی که سازند گچساران آبرفت را قطع نموده نشان‌دهنده خزش این راندگی است. با وجود کواترنری بودن راندگی پیراحمد هیچگونه داده لرزه‌ای از آن در دست نیست.



شکل ۴- گسل راندگی لهبری در روستای بتوند (مسیر جاده اهواز - مسجدسلیمان).
Fig. 4. Lahbari thrust in Batvand village (Ahvaz - Masjed Soleyman road).

آبرفت‌های عهد حاضر رانده شده است. امتداد این گسل تقریباً شرقی - غربی و شیب آن به سمت شمال است. زمین‌لرزه‌های دستگاهی ۱۹۷۳ با بزرگی ۴/۸ ریشتر، زلزله‌های سال ۱۹۹۰ با بزرگی ۴/۹ و ۵ ریشتر و سال ۱۹۹۸ با بزرگی ۵/۴ ریشتر به این گسل نسبت داده شده است.

پهنه گسلی بالا رود

این پهنه، یک گسل امتدادی با مولفه راندگی است که یکی از گسل‌های پیشانی کوهستان محسوب می‌شود و در شمال پهنه اندیمشک - دزفول قرار دارد (شکل ۵). در امتداد این راندگی سازند گچساران بر روی سازندهای آغاچاری و



شکل ۵- گسل بالارود در مخازن سد های دز و بالارود.
Fig. 5. Balarud fault in reservoirs of Dez and Bala rud dams.

و روند شمالی - جنوبی دارد. گسل NS2 نیز با طول ۶۳/۴۶ کیلومتر و راستای شمالی - جنوبی در فاصله ۱/۲۰ کیلومتری غرب شهر شوش قرار گرفته است. بر اساس ساز و کار کانونی زلزله‌های رخ داده، این دو گسل از نوع راستالغز با مولفه راندگی می‌باشند. در جدول (۱) مشخصات و هندسه این گسل‌ها آورده شده است.

گسل‌های بی‌سنگی NS2 و NS1

این دو گسل بر اساس نقشه خطواره‌های مغناطیسی ایران (یوسفی، ۱۳۷۳)، عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای لندست (ETM) و تراکم مراکز زلزله‌های رخ داده در امتداد آنها شناسایی شده‌اند. گسل NS1 به طول ۷۶/۸۵ کیلومتر از فاصله ۴۳/۳۰ کیلومتری شرق شهر دزفول عبور می‌کند

جدول ۱- مشخصات و هندسه گسل‌های موجود در محدوده مورد مطالعه.

Table 1. Fault properties and geometries of the study area.

Fault name	Fault length (km)	Fault type	Strike	Aspect	Distance to Susa (km)	Distance to Dezful (km)	Activity
Dezful	50	Thrust	NW-SE	NE	28.8	2.9	Quaternary
Bala rud	80	Thrust	W-E	N	44.1	62.5	Quaternary
Cheshmeh khosh	50	Thrust	NW-SE	NE	24.3	48	Quaternary
Pir Ahmad	30	Thrust	NW-SE	NE	47	26	Quaternary
Lahbari	150	Thrust	NW-SE	NE	40	16	Quaternary
Basement fault NS1	51	Strike slip with Thrust component	N-S	Vertical fault	57.6	43.3	Quaternary
Basement fault NS2	76	Strike slip with Thrust component	N-S	Vertical fault	14.1	1.2	Quaternary

نتایج و بحث

هدف اصلی مطالعات لرزه‌زمین‌ساختی و تحلیل خطر زلزله شناسایی گسل‌های منطقه، روندهای ساختاری، تاریخچه لرزه‌خیزی و تعیین پارامترهای جنبش زمین است. از سوی دیگر، در روش احتمالاتی تخمین لرزه‌خیزی مبتنی بر آمار و نرخ زلزله‌های رخ داده در منطقه است که از پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف قابل دریافت می‌باشند. در این تحقیق به منظور تحلیل خطر زلزله اطلاعات زلزله‌های دستگاهی ثبت شده در بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۲۰۱۸ (۵۳ سال) اخذ گردید. بر اساس این آمار در محدوده مورد بررسی تعداد ۲۸۵ زلزله با بزرگی بیش از ۳ ریشتر رخ داده است که ۱۲۸ زلزله دارای بزرگی ۴ ریشتر و بیشتر می‌باشند (شکل ۶). تمرکز مراکز زلزله‌ها در بخش‌های شمالی و شمال شرقی حاکمی از فعال بودن گسل‌های این بخش از منطقه است.

هم‌چنین، نمودار توزیع فراوانی سال وقوع زلزله‌های ثبت شده موید آن است که ۴۲ درصد از این زلزله‌ها در فاصله زمانی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۹۱ به وقوع پیوسته‌اند (شکل ۷).

شکل (۸) توزیع فراوانی زلزله‌های رخ داده با بزرگی ۴ و بیشتر بر حسب عمق کانون را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که اکثر زلزله‌های منطقه از نوع کم عمق تا متوسط می‌باشند. حدود ۱۳/۳٪ از این زلزله‌ها در پوسته بالایی و پوشش رسوبی و حدود ۴۱/۹٪ در پی‌سنگی (پوسته زیرین) به وقوع پیوسته‌اند. نکته قابل توجه رخداد ۴۴/۸٪ از زلزله‌ها در گوشته بالایی است که نشان‌گر وجود فعالیت‌های ضخیم پوسته در این منطقه است.

ارزیابی آماری - احتمالاتی خطر زلزله

مطالعه دقیق روند، پراکندگی و فراوانی رخداد زلزله‌ها اهمیت زیادی در برآورد پتانسیل لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه دارد. به همین دلیل، یکی از مهمترین مراحل ارزیابی خطر زلزله جمع‌آوری آمار و اطلاعات زلزله‌ها و بررسی نواحی آسیب دیده در گستره مورد مطالعه است. روش‌های آماری-احتمالاتی بسیاری برای تحلیل خطر زلزله ارائه شده است که یکی از ساده‌ترین و عمومی‌ترین روش‌ها برای تعیین پارامترهای جنبش نیرومند زمین روش گوتنبرگ-ریشتر است. با فرض اینکه وقوع زمین لرزه‌ها در منطقه از توزیع پواسون پیروی کند، می‌توان رابطه (۱) را نوشت.

$$P_T(t) = 1 - \exp(-Nt) \quad (1)$$

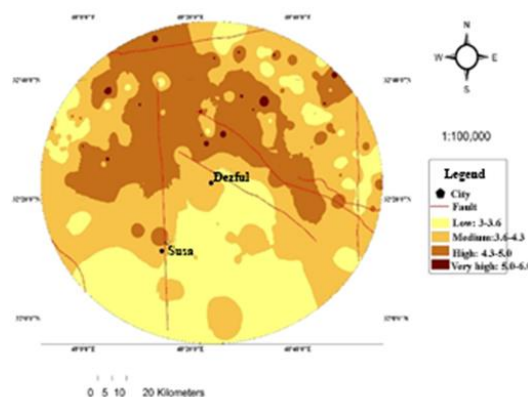
در این رابطه $P_T(t)$ احتمال وقوع زلزله با بزرگی M در مدت زمان t (سال) و N فراوانی تجمعی زلزله‌ها می‌باشد که از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$N = -\frac{\ln(1 - P_T(t))}{t} \quad (2)$$

با محاسبه مقادیر a ، b و N محاسبه بزرگی زلزله‌ها برای دوره‌های بازگشت و درصد احتمال وقوع مختلف از طریق رابطه (۳) تعیین می‌گردد.

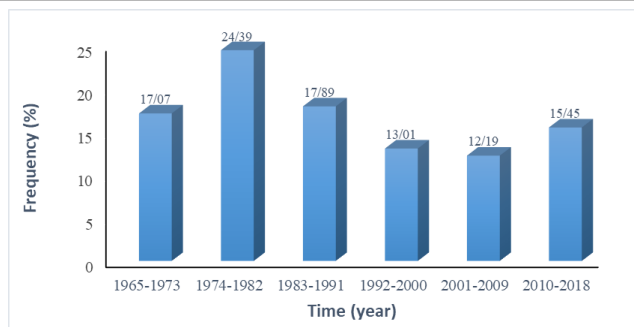
$$M = \frac{a - \text{Log}N}{b} \quad (3)$$

با به دست آوردن بزرگی زلزله‌های احتمالی و اعمال روابط میرایی با در نظر گرفتن فاصله از هر یک از چشمه‌های لرزه‌زا (گسل‌ها) شتاب در درصد احتمال وقوع مختلف قابل محاسبه است.

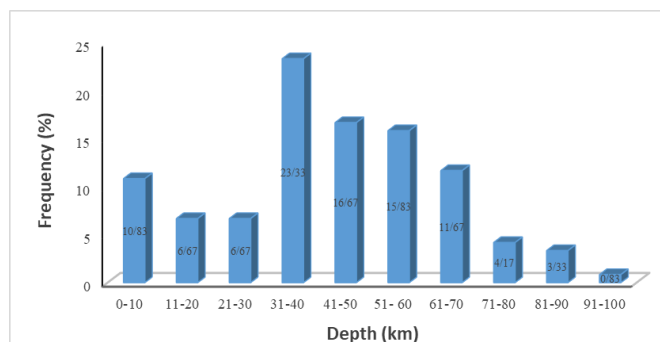


شکل ۶- پهنه‌بندی بزرگی زلزله‌های دستگاهی رخ داده در طی ۵۳ سال گذشته در محدوده مورد بررسی.

Fig. 6. Magnitude mapping of occurred instrumental earthquakes during 53 last years in the study area.



شکل ۷- نمودار توزیع فراوانی سال وقوع زلزله‌های ثبت شده در محدوده مطالعاتی.
Fig. 7. Instrumented earthquake frequencies plot in the study area.



شکل ۸- نمودار توزیع فراوانی کانون زلزله‌های رخ داده نسبت به عمق.
Fig. 8. The frequency distribution plot of focuses for occurred earthquake in the study area.

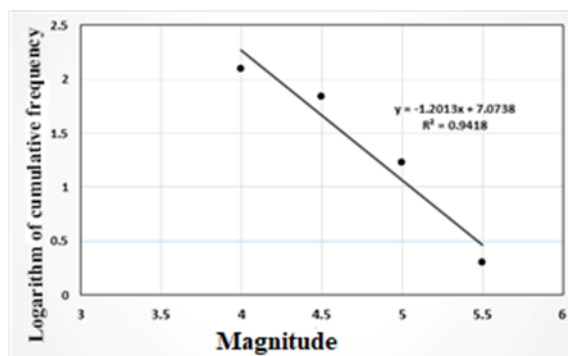
زلزله‌های با بزرگی کوچک بوده‌اند. کوچک بودن بزرگی زلزله‌ها در منطقه ناشی از توان لرزه‌ای پایین و رفتار زمین‌ساختی نامقاوم پی‌سنگ و رسوبات فوقانی در منطقه است.

بر اساس این جدول، بیشینه بزرگی قابل انتظار (احتمال ۱۰ درصد) برای دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برای این منطقه به ترتیب ۶/۴، ۶/۷ و ۶/۷ ریشتر می‌باشد. هم‌چنین، بیشینه بزرگی زلزله مبنای طرح (احتمال ۶۴ درصد) برای دوره‌های بازگشت یاد شده در این منطقه به ترتیب ۵/۶، ۵/۹ و ۶/۱ ریشتر برآورد شده است. از سوی دیگر، برای دوره‌های بازگشت با احتمال وقوع ۰/۳۷ به ترتیب ۵/۷، ۵/۹، ۶/۲ و ۶/۴ ریشتر تخمین زده شده است.

به منظور تعیین الگوی آماری لرزه‌خیزی منطقه، آهنگ فعالیت سالانه (a) و پارامتر لرزه‌خیزی (b) با استفاده از رابطه گوتنبرگ-ریشتر محاسبه گردید. به این منظور با انتقال فراوانی و بزرگای زلزله‌ها رخ داده در منطقه به یک دستگاه مختصات نیمه‌لگاریتمی و برازش بهترین خط عبوری از میان آنها معادله گوتنبرگ - ریشتر و پارامترهای a و b مطابق رابطه (۴) به‌دست آمده است (شکل ۹).

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{Log}N = -1.2013M + 7.0738$$

با توجه به این رابطه مقدار ضریب لرزه‌خیزی و آهنگ فعالیت سالیانه برای منطقه مطالعاتی به ترتیب ۱/۲۰۱۳ و ۷/۰۷۳۸ می‌باشند. این متغیرها نشان می‌دهند که تعداد زلزله‌های رخ داده در این مدت زیاد بوده است، اما عمده آنها



شکل ۹- نمودار توزیع فراوانی گوتنبرگ-ریشتر برای محدوده مطالعاتی.
Fig. 9. The Gutenberg - Richter's frequency distribution plot for recorded earthquakes in the study area.

لرزه زا (گسل‌ها) می‌توان برای درصد احتمال وقوع ۱۰، ۳۷ و ۶۴ درصد و دوره بازگشت ۵۰ ساله شتاب را محاسبه کرد.

با بدست آوردن بزرگی زلزله‌های احتمالی و اعمال رابطه Donovan (۱۹۷۳) (رابطه ۵) و لحاظ نمودن فاصله دو شهر دزفول و شوش از هر یک از چشمه‌های

شهرها به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۳۶g است. در نتیجه، بیشترین شتاب احتمالی وارده به شهر دزفول ناشی از گسل فروبار دزفول و برای شهر شوش مربوط به گسل پی سنگی NS2 می باشد.

با شبکه بندی منطقه با ابعاد ۵*۵ کیلومتر اقدام به تهیه نقشه پهنه بندی شتاب برای محدوده مطالعاتی با احتمال خطر ۰/۱۰ و ۰/۶۴ درصد شده است (شکل ۱۰). همانطور که در این شکل ها مشخص است، بخش های شمالی و میانی گستره مورد مطالعه از بیشترین خطر برخوردار می باشند.

$$a = \frac{1080e^{0.5M}}{(R + 25)^{1.32}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه a شتاب زلزله احتمالی، M بزرگی زلزله احتمالی ناشی از فعالیت چشمه لرزه‌زا و R نزدیک ترین فاصله از چشمه لرزه‌زا می باشد.

جدول (۳) نتایج شتاب برآورد شده برای این منطقه را نشان می دهد. براساس نتایج این جداول، بیشینه شتاب مبنای طرح برای شهرهای دزفول و شوش به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۲۴g می باشد. همچنین، بیشینه شتاب قابل انتظار برای این

جدول ۲- بزرگای برآورد شده به روش آماری-احتمالی در دوره بازگشت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله با احتمال ۱۰٪، ۳۷٪ و ۶۴٪.

Table 2. The result of computation of magnitude for return period of 20, 50, 100, 200 years in 10%, 37% and 64% probability.

Return period (year)	(%) Probability	a	N	LogN	b	M
25	0.10	7.07	0.421	0.375	1.20	6.2
	0.37	7.07	1.848	0.267	1.20	5.7
	0.64	7.07	4.048	0.611	1.20	5.4
50	0.10	7.07	0.211	0.676	1.20	6.4
	0.37	7.07	0.924	0.034	1.20	5.9
	0.64	7.07	2.043	0.310	1.20	5.6
100	0.10	7.07	0.105	0.977	1.20	6.7
	0.37	7.07	0.462	0.335	1.20	6.2
	0.64	7.07	1.022	0.009	1.20	5.9
200	0.10	7.07	0.053	0.278	1.20	7.0
	0.37	7.07	0.231	0.636	1.20	6.4
	0.64	7.07	0.511	0.292	1.20	6.1

جدول ۳- برآورد شتاب به روش احتمالی (Donovan, 1973) برای مراکز جمعیتی دزفول و شوش برای دوره بازگشت ۵۰ ساله.

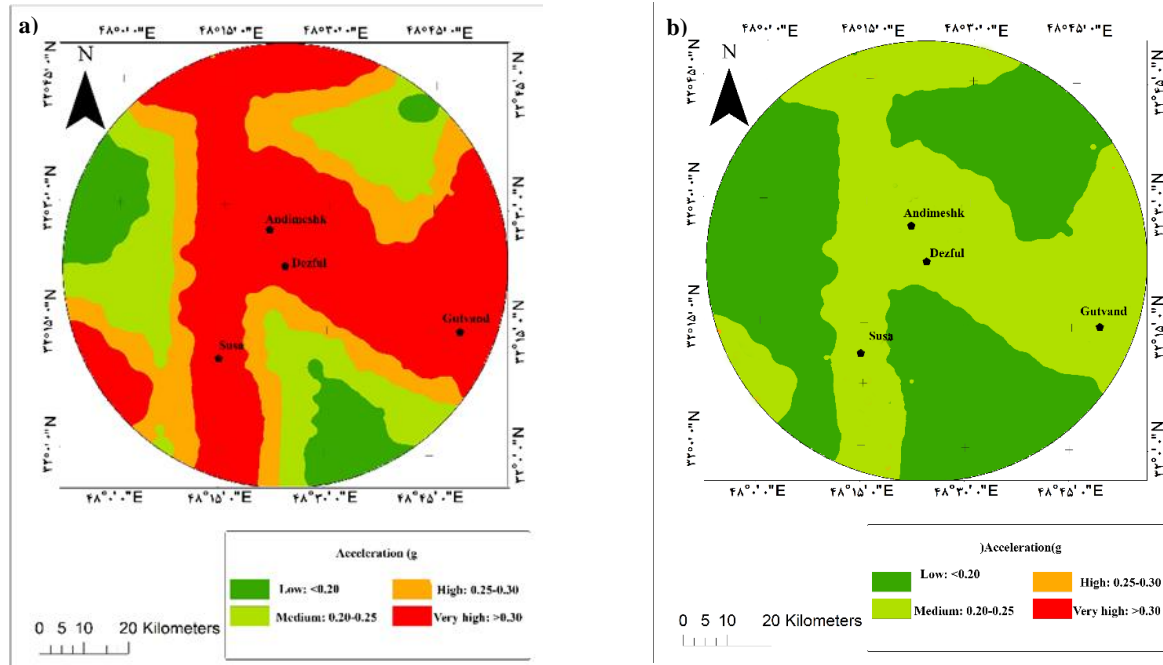
Table 3. The result of computation of peak ground acceleration for Dezful and Susa cities during a 50-year return period according to Donovan's (1973) formula.

Fault type	Distance to Dezful (km)	Distance to Susa (km)	Magnitude (Richter)			Peak ground acceleration (g)					
						0.64		0.37		0.10	
			0.64	0.37	0.10	Dezful	Susa	Dezful	Susa	Dezful	Susa
Dezful	2.90	28.80	5.6	5.9	6.4	0.22	0.09	0.26	0.11	0.33	0.14
Bala rud	62.50	44.10				0.05	0.07	0.06	0.08	0.07	0.10
Cheshmeh khosh	48.00	24.30				0.06	0.10	0.07	0.12	0.09	0.16
Pir Ahmad	26.00	47.00				0.10	0.06	0.12	0.07	0.15	0.09
Basement fault NS1	43.30	57.60				0.07	0.05	0.08	0.06	0.10	0.08
Basement fault NS2	1.20	14.10				0.14	0.24	0.17	0.27	0.21	0.36
Segment no. 5 of Lahbari fault	32.93	51.20				0.08	0.06	0.10	0.07	0.13	0.09
Segment no. 6 of Lahbari fault	32.22	50.04				0.09	0.06	0.10	0.07	0.13	0.09
Segment no. 7 of Lahbari fault	32.20	44.10				0.11	0.07	0.13	0.08	0.16	0.10

نتیجه گیری

برنامه ریزی و گسترش ساخت و سازها در شهرها و حومه آنها مستلزم انجام مطالعات زمین شناسی مهندسی شهری و شناسایی مخاطرات زمین شناسی به ویژه خطر وقوع زمین لرزه است. به همین

دلیل در این تحقیق ارزیابی خطر زلزله در محدوده شهرهای دزفول و شوش با توجه به حضور گسل های فعال و بزرگ در این منطقه و جمعیت بالا مد نظر قرار گرفته است. بررسی زلزله های رخ داده در ۵۳ سال گذشته نشان می دهد که کانون ۵۵/۲ درصد از این زلزله ها در پوسته و مابقی در گوشته قرار دارد.



شکل ۱۰- پهنه بندی شتاب زلزله برای محدوده مطالعاتی به روش دنوان (۱۹۷۳). الف) با احتمال خطر ۱۰ درصد، ب) با احتمال خطر ۶۴ درصد
 Fig. 10. Earthquake acceleration zonation in Donovan's method (1973) for study area. a) 10 percent probability, b) 64 percent probability.

است. مطابق روابط میرایی Donovan (۱۹۷۳) بیشینه شتاب مبنای طرح و قابل انتظار برای شهر شوش به ترتیب ۰/۲۴ g و ۰/۳۶ g و برای شهر دزفول به ترتیب ۰/۲۲ g و ۰/۳۳ g است. همچنین، نقشه پهنه بندی شتاب محدوده مطالعاتی مبین آن است که بخش اعظم این منطقه در ناحیه با خطر زیاد قرار می گیرد. بنابراین، با توجه به نتایج مطالعه حاضر انجام مطالعات ریزپهنه-بندی زلزله در شهرهای این منطقه و مقاوم سازی و تقویت بافت های فرسوده و تاریخی ضرورتی اجتناب ناپذیر است.

مقدار ضریب لرزه خیزی و آهنگ فعالیت سالیانه برای منطقه مطالعاتی به ترتیب ۱/۲۰۱۳ و ۷/۰۷۳۸ که مبین آن است که تعداد زلزله های رخ داده در این مدت زیاد بوده است، اما عمده آنها زلزله های با بزرگی کوچک بوده اند. این موضوع به دلیل توان لرزه ای پایین و رفتار زمین-ساختی نامقاوم پی سنگ و رسوبات فوقانی در منطقه است. بر اساس نتایج ارزیابی آماری - احتمالاتی انجام شده حداکثر زلزله قابل انتظار در بازه زمانی ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله به ترتیب ۶/۷ و ۷/۰ ریشتر است و زلزله های مبنای طراحی (DBE) در این بازه ۵/۹ و ۶/۱ ریشتر

منابع

- Ashayeri, I., Biglari, M., Shamoradi, S. B., Rashidi Gouya, H., 2018. Probabilistic seismic hazard Assessment and geotechnical seismic micro-zonation of Kangavar with ambient vibration and electrical resistivity analysis. *AUT Journal of Civil Engineering* 2 (1), 29-38.
- Baker, J.W., 2013. Probabilistic seismic hazard analysis. White paper, 79p.
- Berberian, M., 1995. Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241, 193-224.
- Alavi, A., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science* 307, 1064-1095.
- Donovan, N.C., 1973. San Fernando earthquake. *Proceeding of 5th World Conference Earthquake Engineering* 2, 1252-1261.
- Gillard, D., Wyss, M., 1995. Comparison of strain and stress tensor orientation: application to Iran and southern California. *Journal of Geophysical Research* 100 (B11), 22197-22213.

- Grunthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., and Bindi, D., 2018. The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineering*. Doi:/10.1007/s10518-018-0315-y.
- Jorjiashvili, N., Elashvili, M., Gigiberia, M., Shengelia, I., 2016. Seismic hazard analysis of Adjara region in Georgia. *Natural Hazards* 81, 745–758.
- Kijko, A., 2011. Introduction to probabilistic seismic hazard analysis. In: *Encyclopedia of solid earth geophysics*, Gupta, H. (ed), Springer, Germany.
- Macleod, J.H., Thompson, J.H., Sahabi, F., 1970. Geological map of Shahbazan (scale 1:100000). Iranian oil Operating Companies.
- Mansoori Bidgani, F., 2018. Siesmotectonic analysis of the Lahbari fault. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz.
- Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y.T., 1998. Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces. *Journal of Earthquake Prediction Research* 7, 465–495.
- Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M., Péquegnat, C., 2014. Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran). *Geological Society* 330, 5-18.
- Perry, J.T.O'B., Setudehnia, A., 1967. Geological map of Dezful (1:100000 scale). Iranian Oil Operating Companies.
- Perry, J.T.O'B., Setudehnia, A., 1967. Geological map of Shushtar (scale 1:100000). Iranian Oil Operating Companies.
- Sahabi, F., Macleod, J.H., 1970. Geological map of Balarud (scale 1:100000). Iranian oil operating companies.
- Yoosefi, E., 1994. Magnetic basement map of Iran (scale 1:2500000). Geological survey & mineral exploration of Iran, Tehran.
- Yoosefi, E., 1994. Magnetic linement map of Iran (scale 1:2500000). Geological survey & mineral exploration of Iran, TehranZ