www.gsjournal.ir

Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, Vol. 33, Issue 3, Serial No. 129, Autumn 2023, pp. 85-96



Original Research Paper

Temporal and spatial changes in the seismicity parameters along Doruneh fault system

Mohammad Hossein Tahriri¹, and Hamid Saffari^{1*}

¹ Department of Structure and Earthquake, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history: Received: 2023 March 08 Accepted: 2023 April 10 Available online: 2023 September 23

Keywords: Doruneh fault Seismicity parameters Spatial changes Temporal changes Seismicity Earthquake

ABSTRACT

The Doruneh fault system with more than 700 km length, after the main Zagros fault, is known as the largest fault in Iran. In this research, this fault system is divided into 3 main parts because the mechanisms of its different parts are different. The western part is reported to have a left lateral strikeslip mechanism with a reverse component, the middle part is a left lateral strike-slip mechanism, and the eastern part is reported to have a reverse mechanism. In this study, seismicity parameters and their temporal and spatial changes along this fault system are analyzed using seismic data collected from 1980 to 2023 and based on the maximum likelihood method. In this regard, the temporal changes of b-value shows two significant drops, which indicate two relatively strong Torbat-e Heydarieh earthquakes in 2010 and the Fariman earthquake in 2017. Despite the fact that the scientific community is not yet able to accurately predict earthquakes, according to the studied method and with the continuous monitoring and analysis of various earthquake parameters, especially *b*-value, it is not far from expected to predict the occurrence of possible earthquakes in the future.

1. Introduction

Nowadays, study of the frequency distribution of earthquakes as a function of magnitude is known as a basic solution in seismological researches. Following relation was first presented in 1944 by Gutenberg and Richter (1944):

 $log\lambda_m = a - bm$ (1)

In equation 1, *a* and *b* are the seismic parameters of the study zone. λ_m is the rate of occurrence of earthquakes per year. Studies show that the *b*-value varies over time and location (Wiemer and Benoit, 1996; Wiemer and Wyss, 1997). Also, *b*-value

sometimes predicts big earthquakes. Li (1978) found that the *b*-value usually goes through three stages before the main earthquake: in the first stage, it increases a little, then a sudden drop, and in the last stage, just before the main earthquake, the *b*-value increases.

The main purpose of the present study is to obtain the seismicity parameters and investigate the spatial and temporal changes of them along the Doruneh fault system located in the northeast of Iran using the updated and complete earthquake catalog.

Archive of SID.ir

* Corresponding author: Hamid Saffari; E-mail: h_saffari@sbu.ac.ir

Citation:

Tahriri, M. H., and Saffari, H., 2023. Temporal and spatial changes in the seismicity parameters along Doruneh fault system. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 85-96. https://doi.org/10.22071/gsj.2023.387658.2068.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi:10.22071/gsj.2023.387658.2068

CC () (S) BY NC @ dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.6.7

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Temporal and spatial changes in the seismicity/ Mohammad Hossein Tahriri, and Hamid Saffari/ G.S.J. 2023, 33 (3): 85-96

2. Data and Research methodology

The Doruneh fault system or the Great Kavir fault was first introduced by Wellman (1966). This fault system is known as the largest fault system in Iran after the main Zagros reverse fault (Fattahi et al., 2007). The Doruneh fault system has more than 700 km long. In the present study, earthquake data in the areas around the Doruneh fault system with longitude 53.9 to 61.3 and latitude 33.7 to 36.1 degrees from January 1, 1980 to February 17, 2023 was used. The catalog was extracted from the website of International Institute of Earthquake Engineering and Seismology of Iran (IIEES).

Different seismographic networks around the world use different methods to report earthquake parameters. This issue causes the inconsistency of the parameters in the reports. Therefore, the next step in this study is to identify the algorithms for recording and determining the characteristics of earthquakes and their magnitude scale. In this study, in order to unify the magnitude unit and to convert the units presented in the catalog into M_w , the relations provided by Shahvar et al. (2013) which is specific to the Iranian plateau were used.

A total of 853 earthquakes with M_w greater than equal to 2.7 were used in this study. The largest earthquakes that occurred in the studied time period are related to the earthquake of August 27, 2010 in Torbet-e Heydarieh with M_w =5.9 and the earthquake of April 5, 2017 in Fariman with M_w =6.1. The epicenter of this earthquake was located 30 km from Sefidsang, 47 km from Fariman, 75 km from Torbat Jam and 86 km from Mashhad. According to local reports, after this earthquake, communication lines, mobile phones were disrupted in the earthquake affected areas.

The ability of each seismographic network to record earthquakes depends on the density and distribution of seismographic stations, the software and hardware characteristics of the seismographs, and the location of the station. Quantitative measurement of this ability requires complex calculations that are performed by calculating the minimum magnitude of completeness of earthquakes (M_e). The maximum curvature method proposed by Woessner and Wiemer (2005) was used to evaluate the minimum magnitude of the seismicity of the region. This method is an updated version of the Wiemer and Wyss method (Wiemer and Wyss, 2000).

The methods that are usually used to calculate the b-value include the maximum likelihood method (Aki, 1965; Shi and Bolt 1982; Utsu 1965) and the least squares method (Main, 2000; Zöller et al., 2002). The maximum likelihood method considers the contribution of each seismic event as the same and averages the magnitude of all earthquakes with the same weight. Compared to the maximum tendency method, the least squares method considers more weight for small and medium earthquakes (Xie et al., 2022). A large number of studies (Goldstein et al., 2004; Nava et al., 2017;

Newman, 2005) have shown that the standard deviation of the maximum likelihood method is more than twice that of the least squares method. When the seismic catalog is small, the maximum tendency method provides a more accurate estimate than the least square method, which is used in this study.

3. Results and Discussion

The present study was conducted in order to obtain the seismicity parameters and investigate the spatial and temporal changes of the seismicity parameters along the Doruneh fault system located in the northeast of Iran, as well as to relate the prediction of earthquake occurrence with the temporal distribution of parameter b in the study area. The results of this study were presented and analyzed in three parts: seismicity parameters, spatial changes of seismicity parameters, and temporal changes of them.

The graph of the distribution of the frequency of earthquakes was drawn in order to obtain the parameters of the seismicity of the region by zmap7.1 software. The *b*-value in the region is 0.80, the *a*-value is 5.66, and the minimum magnitude of the earthquake in the region is 3.60. The minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs is defined as the magnitude at which 90% of the data can be modeled by a power law fit (Wiemer and Wyss, 2000).

Preparation and examination of the b parameter map provides very important information about the seismic activity of an area. For this purpose, in order to check the local changes of values of seismicity coefficients a and b, spatial distribution maps of seismicity coefficients were calculated using Wiemer's method (Wiemer, 1996) in zmap7 software. The spatial changes of bindicate the changes of this parameter from 0.85 to 1.25. The time distribution map of b shows the distribution of stress in the studied area, such that low values of b are areas that bear a lot of stress and high values of b are areas that bear little stress.

This different stress accumulation leads to different return periods of earthquakes in different parts of this fault system. Also, by using the method introduced in the previous section, the spatial changes of standard deviation b were obtained. This value is less than 0.12 in the entire studied area, except for a small part. Finally, the spatial changes of *a*-value show that the events are not uniformly distributed in the studied area, and higher values of *a* indicate greater seismicity of the area. The changes of this parameter are from 5.8 to 6.8.

The maximum likelihood method (MLE) was used to investigate the temporal changes of parameter b in the study area from 1995 to now. According to the number of earthquakes in the study area, the window size was 100 earthquakes. The graph of time changes of *b*-value from 1993 to 2023 can be seen in the figure below.

According to Figure 8, the differences in b-value before and

2096: U

Temporal and spatial changes in the seismicity/ Mohammad Hossein Tahriri, and Hamid Saffari/ G.S.J. 2023, 33 (3): 85-96

after 2010 and before and after 2017 were significant. With further investigations of the studied area, we found that the decrease in parameter b in 2010 is related to the 5.9 Torbat-e Heydarieh earthquake (star no. 1) and the severe drop in the earthquake in 2017 is related to the Fariman earthquake (star no. 2) with a magnitude of 6.1. The occurrence of a foreshock may lead to a slight decrease in the b-value a few days before the main earthquake. Post-seismic activity also leads to more changes in b value (El-Isa and Eaton, 2014).

4. Conclusion

In this study, 853 earthquakes with moment magnitude greater than equal to 2.7 were used. Seismicity parameters like spatial and temporal changes along the Doruneh fault system located in the northeast of Iran were studied using the updated and complete earthquake catalog until 2023. This research showed that the temporal and spatial changes before a large earthquake clearly can be seen in the couple of months before. Considering that the accurate prediction of earthquakes is currently a global scientific problem, it is possible to prevent serious damage by carefully monitoring the *b*-value in each region. However, it should be noted that *b* changes before large earthquakes can be very complex, and earthquakes cannot be successfully predicted using only *b*-value changes. For a more accurate prediction of an earthquake, a set of pre-indicators should be used together.

Acknowledgment

This paper is a part of the master's thesis of the first author of the article belonging to Shahid Beheshti University of Tehran. Also, the authors express their gratitude for the valuable comments and suggestions of the editor-in-chief and the reviewers.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۲ ۱۴۰۰، دوره ۳۳، شماره ۳، پیاپی ۱۲۹، صفحه ۸۵ تا ۹۶

پیوند صفحہ نخست: www.gsjournal.ir

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی در امتداد سامانه گسلی درونه

محمدحسین تحریری ا و حمید صفاری ا*

مقاله پژوهش

ا گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاريخچە مقالە:	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷	پژوهش، این سامانه گسلی به ۳ بخش اصلی تقسیم شده است زیرا سازوکار بخشهای مختلف آن متفاوت است. بخش باختری دارای
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱	سازوکار امتدادلغز چپبر با مولفه معکوس، بخش میانی امتدادلغز چپبر و بخش خاوری با سازوکار معکوس گزارش شده است. در پژوهش
تاريخ انتشار: ۱۳۰۱/۰۷/۰۱	حاضر، پارامترهای لرزهخیزی و تغییرات زمانی و مکانی آنها در امتداد این سامانه گسلی با استفاده از دادههای لرزهای جمع آوری شده از
	سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ میلادی و بر اساس روش بیشینه تمایل مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. در این راستا تغییرات زمانی پارامتر b دو افت
کلیدواردها. گسل درونه	قابل توجه را نشان میدهد که نشانگر دو زلزله نسبتا قوی تربت حیدریه در سال ۲۰۱۰ و زلزله فریمان در سال ۲۰۱۷ میباشد. بهرغم این که
پارامترهای لرزهخیزی	هنوز جامعه علمي قادر به پيشربيني دقيق زمين لرزه نشده است، اما با توجه به روش موردمطالعه و با پايش و تحليل مستمر پارامترهاي مختلف
توزيع مكاني	زمینلرزه به ویژه پارامتر b، پیش یابی وقوع زمینلرزههای محتمل دور از انتظار نیست.
توزيع زماني	
لرزەخىزى	
زلزله	

1- پیشنوشتار

امروزه بررسی توزیع فراوانی زلزلهها بهصورت تابعی از بزرگا، بهعنوان راهکاری اساسی در مطالعات زلزلهشناسی شناخته میشود. این رابطه برای نخستین بار در سال ۱۹۴۴ توسط گوتنبرگ و ریشتر (Gutenberg and Richter, 1944) ارائه شد: اوg کم = - 10m (۱)

در معادله ۱، که به معادله گوتنبرگ ریشتر کلاسیک شناخته میشود، a و dپارامترهای لرزهای منطقه مورد مطالعه و $_m \lambda$ نیز نرخ وقوع زلزلهها در سال می،اشند. پارامتر d رخداد نسبی زلزلههای بزرگ و کوچک را نشان می دهد. روش گوتنبرگ ریشتر کلاسیک بازهای نامتناهی از زلزلهها را شامل می شود ولی می دانیم رخداد زلزله با بزرگای بیش از حد بزرگ برای یک منطقه خاص غیرمنطقی است. برای مثال، با توجه به تاریخچه فعالیت سامانه گسلی درونه، سازو کار چیره و نرخ لغزش حدود ۲/۵ میلی متر در سال (Mousavi et al., 2021)، رخداد زلزله با بزرگای بیشتر از 8-5 $_m$ در ناحیه مورد مطالعه دور از انتظار است (Farbod et al., 2011). از

سوی دیگر، از دیدگاه مهندسی، اثر زلزلههای بسیار کوچک بر روی انسانها شایان توجه نبوده و میتوان از این زلزلهها چشمپوشی کرد. با توجه به موارد یاد شده، کران بالا و پایینی از بزرگا برای هر منطقه، با در نظر گفتن ویژگیهای فیزیکی آن تعریف میشود. بنابراین، مقدار بزرگاهای قابل قبول در محدودهای بین کران انتخاب شده خواهد بود و رابطه گوتنبرگ–ریشتر دوکراندار به شکل زیر بیان می گردد (McGuire and Arabasz, 1990)

 $\lambda(m) = \lambda(m_0) \frac{\exp(-\beta(m-m_0)) - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))}{1 - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))} \quad for \quad m_0 \le m \le m_{\max} \quad (\Upsilon)$

در رابطه ۲، پارامتر β نسبت بین زلزلههای بزرگ و کوچک را بیان می کند و λ(m). β =b ln10 نرخ وقوع زلزلههای با بزرگای برابر یا بیشتر از m در سال است. همچنین m_{max} و m_imنشاندهنده آستانه بالا و پایین بزرگا در منطقه مورد مطالعه است. اغلب کران پایین در محدوده ۴ تا ۲/۵ انتخاب می شود زیرا زلزلههای کمتر از این

* نويسنده مسئول: حميد صفاري؛ E-mail: h_saffari@sbu.ac.ir

ماخذنگاری:

تحریری، م. ح.، و صفاری، ح.، ۱۴۰۲، بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی در امتداد سامانه گسلی درونه. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۳)، ۱۲۹، ۸۵–۹۶. https://doi.org/10.22071/gsj.2023.387658.2068.

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

doi doi: 10.22071/gsj.2023.387658.2068

dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.6.7

C () (S) This i

This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



یانی: Sigor

مقدار بەندرت مىتوانند خسارات مهمى ايجاد كنند.

مطالعات نشان میدهند مقدار پارامتر d در طول زمان و مکان متغیر است (Wiemer and Benoit, 1996; Wiemer and Wyss, 1997) . همچنین، پارامتر d کاهی اوقات زلزلههای بزرگ آینده را پیش بینی می کند. به عنوان مثال، پارامتر d در پیش لرزههای پیش از زلزله اصلی هایچنگ (Haicheng) در شمال خاوری کشور چین در سال ۱۹۷۵ به ۰۶ رسیده بود (Wu et al., 1978). همچنین لی (Li, 1978) در مال خاوری کشور اول کمی افزایش می یابد سپس یک افت ناگهانی و در مرحله آخر و درست پیش از زلزله اصلی، پارامتر d افزایش می یابد.

کاهش مقدار پارامتر ط نشاندهنده افزایش تنش پیش از یک زلزله بزرگ میباشد (Schilz, 1968). در سال ۲۰۰۶ ناکایا (Nakaya, 2006) نشان داد مقدار پارامتر d پیش از وقوع زلزله سال ۲۰۰۳ تو کاچی–او کی (Tokachi-Oki) ژاپن به مقدار قابل توجهی (Miyagi) کاهش یافته است. همچنین، کاهش پارامتر d پیش از زلزله سال ۲۰۰۳ میاگی (Miyagi) کاهش یافته است. همچنین، کاهش پارامتر d پیش از زلزله سال ۲۰۰۳ میاگی (Miyagi) ژاپن با بزرگای ۶/۲ نیز اتفاق افتاده است (Nuanin et al., 2008). به ویژه نوانین (Sustin et al., 2005) در سال ۲۰۰۴ و بزرگای ۹ در سال مربوط به زمان وقوع دو زلزله با بزرگای ۷ در سال ۲۰۰۴ و بزرگای ۹ در سال ۲۰۰۴ در ایسلند باشد. چن و ژو (Wenchuan) چین ضمن ارائه مفاهیم جدیدی برای از زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان (Wenchuan) چین ضمن ارائه مفاهیم جدیدی برای مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۲ تغییرات مکانی و زمانی پارامتر d بررسی و نشان داده شد پیش از زلزله سیچوان (Sichuan) چین پارامتر d بررسی و نشان داده شد پیش از زلزله سیچوان (Sichuan) چین پارامتر d بررسی و نشان داده مد و نشان داده به راماتر می به داشته است در نظر گرفته شود.

هدف اصلی مطالعه حاضر، بهدست آوردن پارامترهای لرزهخیزی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی در امتداد سامانه گسلی درونه واقع در شمال خاور ایران با استفاده از کاتالوگ زلزله بهروز و کامل میباشد.

۲- روش پژوهش

توانایی هر شبکه لرزهنگاری در ثبت زمینلرزهها به تراکم و توزیع ایستگاههای لرزهنگاری، ویژگیهای نرمافزاری و سختافزاری لرزهنگارها و شرایط مکانی ایستگاه بستگی دارد. اندازه گیری کمی این توانایی نیاز به محاسبه پارامتر کمینه بزرگای کامل بودن زلزلهها (M) دارد. برای ارزیابی کمینه بزرگای کامل بودن زلزلههای منطقه، از روش بیشینه انحنا پیشنهاد شده توسط وسنر و ویمر (Woessner and Wiemer, 2005) استفاده شد. این روش نسخه بهروز شدهای از روش ویمر و ویس (Wiemer and Wyss, 2000) است.

روش هایی که معمولا برای محاسبه پارامتر d استفاده می شوند، شامل روش بیشینه تمایل (Aki, 1965; Shi and Bolt, 1982; Utsu, 1965) و روش کمینه مربعات (Main, 2000; Zoller et al., 2002) می باشد. روش بیشینه تمایل سهم هر رویداد لرزهای را یکسان در نظر می گیرد و بزرگای تمام زمین لرزه های با وزن یکسان را به طور میانگین محاسبه می کند. در مقایسه با روش بیشینه تمایل، روش حداقل مربعات، وزن بیشتری را برای زمین لرزه های کوچک و متوسط در نظر می گیرد (Xie et al., 2022). تعداد زیادی از مطالعات (Xie et al., 2022) (Xie et al., 2022) نشان داده اند که انحراف استاندارد روش بیشینه تمایل بیش از دو برابر روش حداقل مربعات است. زمانی که کاتالو گ لرزه ای کوچک باشد، روش بیشینه تمایل تخمین دقیق تری نسبت به روش حداقل مربعات

ارائه میدهد که در این مطالعه، از این روش استفاده شده است. مقدار پارامتر b در رابطه ۱ را میتوان با استفاده از معادله ۳ برآورد کرد (;Bender, 1983; Aki, 1965) 1 (Utsu, 1965):

$$b = \frac{1}{\overline{M} - M_{\min}} \log e \tag{7}$$

 M_{\min} و بزرگای متوسط زلزلههای موجود در کاتالوگ زلزله و \overline{M} ، \overline{M} ، \overline{M} ، \overline{M} ، \overline{M} - حداقل بزرگا است. انحراف معیار پارامتر b نیز توسط فرمول ۴ قابل محاسبه است (Shi and Bolt, 1982):

$$\sigma b = 2.3b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_i - \overline{M})^2 / n(n-1)}$$
(F)

در رابطه ۴، \overline{M} بزرگای متوسط زلزلههای موجود در کاتالوگ و M_i بزرگای زلزله ام است. برای تجزیه و تحلیل دادههای لرزهای از نرمافزار M_i وک و M_i بزرگای زلزله ام است. برای تجزیه و تحلیل (Wiemer, 2001; Wiemer and Wyss, 2000) Zmap7) استفاده شد. این نرمافزار، تحت نرمافزار متلب اجرا می شود و برای استفاده عموم به طور رایگان قرار داده شده است.

3- دادهها و اطلاعات

سامانه گسلی درونه یا گسل بزرگ کویر، برای نخستین بار توسط ولمن (Wellman, 1966) معرفی شد. این سامانه گسلی پس از گسل اصلی معکوس زاگرس، بهعنوان بزرگترین سامانه گسلی ایران شناخته می شود (Zattahi et al., 2007). گسل درونه یکی از گسل های بزرگ ایران است که از مرز خاوری ایران تا مرکز دشت کویر به طول بیش از ۷۰۰ کیلومتر امتداد دارد (2021). اس Mousavi et al., 2021). با توجه به شکل خمیده این گسل (شکل ۱) می توان آن را به ۳ بخش کلی تقسیم کرد: الف) بخش خاوری گسل درونه از مرز افغانستان تا شهرستان تربت حیدریه ادامه می شود. ب) بخش مرکزی از تربت حیدریه تا حوالی روستای انابد و ج) بخش باختری از انابد تا انارک ادمه دارد (شیخ الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲). سازو کار بخش باختری گسل بدون مولفه معکوس و ناحیه خاوری به صورت معکوس می باشد (Farbod et al., 2011).

کاتالوگ زلزله یکی از مهم ترین منابع داده در مطالعات مختلف مربوط به لرزه خیزی، لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر زلزله می باشد. تهیه کاتالوگ دقیق و کامل از زمین لرزه ها گامی مهم در تعیین فعالیت لرزه ای یک منطقه معین است. در پژوهش حاضر، از ۸۵۳ زمین لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از ۲/۷ در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. داده های زمین لرزه در نواحی اطراف سامانه گسلی درونه با طول جغرافیایی ۵۳/۹ تا ۶۱/۳ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ از کاتالوگ زمین لرزه های پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله استخراج شد (شکل ۱). این کاتالوگ خود شامل منابع مختلفی مانند NAB می باشد.

شبکههای مختلف لرزهنگاری در سرتاسر جهان، روش های متفاوتی برای گزارش پارامترهای زلزله به کار می برند. این موضوع سبب ناهماهنگی پارامترهای موجود در گزارش ها می شود. از این رو، گام دیگر در این مطالعه، شناسایی الگوریتم های ثبت و تعیین مشخصات زلزله ها و مقیاس بزرگای آنها است. در این مطالعه، جهت یکسان سازی واحد بزرگا و برای تبدیل واحدهای ارائه شده در کاتالوگ به بزرگای گشتاوری از روابط ارائه شده تو سط شاهوار و همکاران (Shahvar et al., 2013) که مخصوص فلات ایران است، استفاده شد (شکل ۲).

Jooic

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پار امترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۱۴۰۲، ۳۳ (۳): ۸۵–۹۶



شکل ۱– A) محدوده مورد مطالعه با طول جغرافیایی ۵۳/۹ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه و B) زمین لرزههای ثبت شده در منطقه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ (ستارههای زرد نشان دهنده زمین لرزههای بزرگتر از M_w=5.8 می باشند).

Figure 1- A) The studied area with longitude 53.9 to 61.3 degrees and latitude 33.9 to 36.1 degrees and B) Earthquake event in the area from January 1, 1980, to February 17, 2023 (yellow stars indicate $M_w > 5.8$).

Regression Relations for Each Couple of Magnitudes		
Coefficient of Relationships	R ²	rms* Error
Regression Relation between M_s and M_w ($M_s < 6.1$)		
SR : M $\leftarrow 0.589(\pm 0.012)$ M + 2.420(± 0.055)	0.872	0.145
ISR : $M \leftarrow 1.483(\pm 0.029)M = -2.996(\pm 0.152)$	0.678	0.230
$OR: M_{w} = 0.611(\pm 0.010)M_{*} + 2.314(\pm 0.047)$	0.871	0.124
Regression Relation between M ₂ and M ₂ (M ₂ \geq 6.1)		
SR: M $\leftarrow 0.887(\pm 0.047)$ M + 0.656(± 0.316)	0.862	0.171
ISR : $M \leftarrow 1.004(\pm 0.043)M^{\circ} + 0.072(\pm 0.285)$	0.848	0.179
$OR: M^{s} = 0.949(\pm 0.029)M^{w} + 0.243(\pm 0.192)$	0.858	0.126
Regression Relation between m. and M. Alborz–Central Iran Region		
SR: $M \leftarrow 1.107(\pm 0.052)m + 0.117(\pm 0.273)$	0.780	0.213
ISR : $m \leftarrow 0.665(\pm 0.034)M + 1.556(\pm 0.186)$	0.860	0.207
$OR: M = 1.303(\pm 0.034)m - 1.292(\pm 0.178)$	0.759	0.153
Regression Relation between m _k and M _m , Zagros Region		
SR : M $\leftarrow 0.917(\pm 0.023)$ m, $+ 0.507(\pm 0.115)$	0.796	0.341
ISR : $m \leftarrow 0.869(\pm 0.022)M^{b} + 0.568(\pm 0.111)$	0.806	0.274
$OR: M_w = 1.030(\pm 0.017)m_b - 0.057(\pm 0.082)$	0.784	0.223
Regression Relation between M ₁ and M ₂		
$SR: M_{w} \leftarrow 0.701(\pm 0.036)M_{1} + 1.656(\pm 0.176)$	0.793	0.190
ISR : $\dot{M_L} \leftarrow 1.138(\pm 0.059) \dot{M_w} - 0.904(\pm 0.296)$	0.664	0.242
OR : $M_w = 0.763(\pm 0.029)M_L + 1.355(\pm 0.142)$	0.787	0.153
Regression Relation between M_N and M_w		
SR : $M_w \leftarrow 0.768(\pm 0.035)M_N + 1.272(\pm 0.183)$	0.816	0.197
ISR : $M_N \leftarrow 1.067(\pm 0.049)M_w - 0.430(\pm 0.257)$	0.745	0.233
OR : $M_w = 0.834(\pm 0.028)M_N + 0.932(\pm 0.143)$	0.810	0.154
Regression Relation between M _N and M _L , Alborz–Central Iran Region		
SR : $M_{\rm L} \leftarrow 0.921(\pm 0.012)M_{\rm N} + 0.125(\pm 0.044)$	0.849	0.19
ISR : $\dot{M_{N}} \leftarrow 0.922(\pm 0.012)\dot{M_{I}} + 0.432(\pm 0.042)$	0.848	0.19
OR : $M_1 = 0.999(\pm 0.009)M_N - 0.160(\pm 0.032)$	0.842	0.137
Regression Relation between M _N and M _L , Zagros Region		
SR : $M_{\rm L} \leftarrow 0.945(\pm 0.009)M_{\rm N} + 0.123(\pm 0.032)$	0.871	0.181
ISR : $\dot{M_{N}} \leftarrow 0.922(\pm 0.009)\dot{M_{L}} + 0.350(\pm 0.030)$	0.875	0.179
OR $:M_1 = 1.014(\pm 0.006)M_N - 0.123(\pm 0.023)$	0.867	0.13
Regression Relation between m _b - M _s , Alborz–Central Iran region		
SR : $M_s \leftarrow 1.285(\pm 0.027)m_b - 1.653(\pm 0.124)$	0.746	0.436
ISR : $m_{b} \leftarrow 0.581(\pm 0.012)M_{s} + 2.100(\pm 0.052)$	0.885	0.293
OR $:M_s = 1.576(\pm 0.016)m_b - 2.965(\pm 0.072)$	0.708	0.251
Regression Relation between mb and Ms, Zagros Region		
SR : $M_s \leftarrow 1.071(\pm 0.021) m_b - 0.866(\pm 0.095)$	0.846	0.414
$\ SR : m_b \leftarrow 0.606(\pm 0.012)M + 2.081(\pm 0.047)$	0.801	0.311
$\frac{\text{UK} : \text{M} = 1.420(\pm 0.013)\text{m}_{-} - 2.415(\pm 0.060)}{\text{The chosen regression for each magnitude couple is shown in hold}$	0.579	0.26
*rms_root mean square		
mis, root mean square.		

شکل ۲- روابط رگرسیون برای تبدیل هر زوج بزرگای لرزهای (Shahvar et al., 2013).

Figure 2. Regression Relations for Each Couple of Magnitudes (Shahvar et al., 2013).

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۲۰ ۱۴ ، ۳۳ (۳): ۸۵–۹۶

10000

در مجموع، از ۸۵۳ زمین لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از ۲/۷ در این مطالعه استفاده شد. بزرگ ترین زلزله های رخداده در باز زمانی مورد مطالعه، مربوط به زلزله ۲۷ اگوست سال ۲۰۱۰ تربت حیدریه با بزرگای گشتاور ۹/۹ و زلزله ۵ آوریل ۲۰۱۷ در فریمان با بزرگای گشتاور ۱/۶ و ژرفای ۱۰ کیلومتری زمین می باشد. رومرکز این زمین لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. بیشینه شتاب ایجاد شده توسط این زمین لرزه در سفیدسنگ حدود g ۱/۱۰ فریمان حدود g ۲/۰، تربت جام حدود ۶۹/۰ و مشهد حدود g ۹/۰ گزارش شد.

نمودار بزرگا- زمان در منطقه مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ در شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار بزرگا- زمان منطقه مورد مطالعه، قابلیت تشخیص زلزلهها از سال ۲۰۰۵ بهدلیل افزایش رویدادهای کوچک ثبت شده، بهمقدار قابل توجهی بهبود یافته است (شکل ۳).

4- بحث

پژوهش حاضر به منظور بهدست آوردن پارامترهای لرزهخیزی و بررسی

تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی در امتداد سامانه گسلی درونه واقع در شمال خاوری ایران، همچنین ارتباط دادن پیش یابی رخداد زلزله با توزیع زمانی پارامتر b در منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. نتایج این مطالعه، در سه بخش: پارامترهای لرزهخیزی منطقه، تغییرات مکانی پارامترهای لرزهخیزی و تغییرات زمانی پارامترهای لرزهخیزی ارائه و مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۱- پارامترهای لرزهخیزی منطقه

ترسیم نمودار توزیع فراوانی زلزله ها نسبت به بزرگا جهت به دست آوردن پارامترهای لرزه خیزی منطقه توسط نرم افزار Zmap7 انجام شد. نمودار بزرگا- فراوانی محدوده مورد مطالعه در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۴، مقدار پارامتر *b* منطقه ۸٬۰۰۰، پارامتر ۵، ۵/۶۳۰ و مقدار کمینه بزرگای کامل بودن زلزله در منطقه ۳/۶ می باشد. بزرگای کاملی زلزله طبق تعریف کوچک ترین بزرگای زلزله است که تمام زلزله های بزرگت از آن در ناحیه توسط دستگاه های لرزه نگاری ثبت می شوند (Wiemer and Wyss, 2000)



شکل ۳– نمودار بزرگا– زمان در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ (ستارههای زرد نشاندهنده زمینلرزههای بزرگتر از M_w=5.8 میباشند).

Figure 3. Magnitude-time diagram in the studied area from January 1, 1980, to February 17, 2023 (yellow stars indicate $M_w>5.8$).



شکل ۴- نمودار بزرگا- فراوانی محدوده مورد مطالعه (مربعهای سفید نشاندهنده توزیع تجمعی رویدادها و مربع های خاکستری نشاندهنده رویدادهای تجمیع نشده است).

Figure 4. Magnitude-frequency diagram of the studied area (white squares indicate the cumulative distribution of events and gray squares indicate unaggregated events).

مروينين الم

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پار امترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۲ ۱۴۰٬ ۳۳ (۳): ۸۵–۹۶

4-4- تغییرات مکانی پارامترهای لرزهخیزی

تهیه و بررسی نقشه مقدار پارامتر b اطلاعات بسیار مهمی را درباره فعالیت لرزهای یک ناحیه ارائه می دهد. بدین منظور، جهت بررسی تغییرات محلی مقادیر ضرایب لرزه خیزی a و b نقشه های توزیع مکانی ضرایب لرزه خیزی با استفاده از روش ویمر (Wiemer, 1996) در نرمافزار Zmap7 محاسبه شد. نقشه تغییرات مکانی e-value (شکل ۵) نشان دهنده تغییرات این پارامتر از ۸۸۵ تا ۱/۲۵ می باشد. این نقشه بیانگر توزیع تنش در منطقه مورد مطالعه است، به گونهای که مقادیر کم b نواحی هستند که تنش زیادی را تحمل می کنند و مقادی زیاد b نواحی هستند که تنش کمی را

تحمل میکنند. این انباشت متفاوت تنش، به دوره باز گشتهای متفاوت زلزلهها در بخشهای مختلف این سامانه گسلی میانجامد.

با استفاده از روش معرفی شده در بخش پیشین، تغییرات مکانی انحراف معیار b بهدست آمد (شکل ۶). این مقدار، در کل گستره مورد مطالعه، بهجز بخش کوچکی کمتر از ۱۲۰ میباشد. نقشه تغییرات مکانی پارامتر a (شکل ۷) نشان میدهد رویدادها بهصورت یکنواخت در منطقه مورد مطالعه توزیع نشدهاند. مقادیر بیشتر a نشاندهنده لرزه خیزی بیشتر ناحیه است. تغییرات این پارامتر از ۵/۸ تا ۷ میباشد.



شکل ۵– تغییرات مکانی پارامتر b در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳. Figure 5. Spatial changes of b-value in the study area from January 1, 1980, to February 17, 2023.







شکل ۷- تغییرات مکانی پارامتر a در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳. Figure 7. Spatial changes of *a*-value in the studied area from January 1, 1980, to February 17, 2023.

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پار امترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۲ ۱۴ ۱۴، ۳۷ (۳): ۸۵–۹۶

۴-۳- تغییرات زمانی پارامترهای لرزهخیزی

برای بررسی تغییرات زمانی پارامتر b در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۹۹۵ تاکنون، از روش بیشینه تمایل (MLE) استفاده شده است. با توجه به تعداد زلزلههای منطقه مورد مطالعه، اندازه هر پنجره ۷۵ زلزله و همپوشانی وقایع ۴% در نظر گرفته شد. نمودار تغییرات زمانی پارامتر b از سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۲۳ در شکل ۸ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۸ تفاوتها در مقادیر پارامتر *d* پیش و پس از سال ۲۰۱۰ همچنین پیش و پس از سال ۲۰۱۷ معنی دار بود. با بررسی های بیشتر منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که افت پارامتر *d* در سال ۲۰۱۰ مربوط به زلزله ۵/۹ تربت حیدریه (ستاره شماره ۱) و افت شدید پارامتر *d* در سال ۲۰۱۷ مربوط به زلزله فریمان (ستاره شماره ۲) با بزرگای گشتاور ۶/۱ می باشد. رخداد پیش لرزه ممکن است به کاهش جزئی پارامتر *d* چند روز پیش از زلزله اصلی بیانجامد. فعالیت پس لرزه نیز منجر به تغییرات بیشتر در مقدار b-valu.

به منظور بررسی دقیق تر پیش نشانگر b-value در منطقه، این ناحیه به سه زیر منطقه

تقسیم شد: الف) بخش باختری با طول جغرافیایی ۵۳/۹ تا ۵۶/۴ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه، ب) بخش میانی با طول جغرافیایی ۵۶/۴ تا ۵۸/۹ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ درجه، ج) بخش خاوری با طول جغرافیایی ۵۸/۹ تا ۶۱/۴ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه. هر کدام از این زیرمنطقه ها دربردارنده قطعات عرض جنرافیایی و خاوری گسل درونه می باشند. با توجه به کمتر بودن زلزله های هر زیرمنطقه نسبت به منطقه اصلی، اندازه پنجره برای محاسبه تغییرات زمانی پارامتر ط، ۰۵ رویداد با همیو شانی ۴% استفاده شد.

تغییرات زمانی b-value در بخش خاوری منطقه مورد مطالعه (شکل ۹)، روند تقریبا ثابتی را طی سالهای ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ طی کرده و افت یا صعود شدیدی را تجربه نکرده است. اما از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ دچار افت شدید شده و از ۱/۱ تا ۱/۰ بهسرعت کاهش یافته است. این افت شدید پارامتر *d* و سپس افزایش آن می تواند پیشنشانگری از زلزله ۵ آوریل ۲۰۱۷ فریمان با بزرگای گشتاور ۶/۱ باشد. این پیشنشانگر در بررسی کلی منطقه (شکل ۸) نیز نمایان شده است.



شکل ۸- تغییرات زمانی پارامتر b در محدوده موردمطالعه طی سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ (ستارههای زرد نشاندهنده زمین لرزههای بزرگتر از ۵/۸ در منطقه مورد مطالعه و خطچینها نشان دهنده انحراف استاندارد مقادیر b-value می باشند).

Figure 8. Temporal changes of *b*-value in the study area during the years 1993 to 2023 (yellow stars indicate earthquakes greater than 5.8 in the study area and the dashed line shows the standard deviation of *b*-value).



شکل ۹- تغییرات زمانی پارامتر b در بخش خاوری گسل درونه (خطچینها نشاندهنده انحراف استاندارد مقادیر b-value می باشند).

Figure 9. Temporal changes of the *b*-value in the eastern part of the Doruneh fault (the dashed line shows the standard deviation of the *b*-value).

تغییرات زمانی b-value در بخش میانی گسل درونه (شکل ۱۰) نشانگر نوساناتی با شدت کم بین مقادیر ۰/۹ تا ۱/۵ طی سالهای ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۱ برای پارامتر b است و هیچ نشانی از افت ناگهانی مقدار b-value در نمودار وجود ندارد، از این رو، پیشنشانگری از زلزله بزرگ در این منطقه مشاهده نشد.

با توجه به تعداد کم رخدادهای لرزهای در بخش باختری گسل درونه، تغییرات

پارامتر b در طول زمان فاقد دقت کافی و غیر قابل بهرهبرداری جهت استفاده در بحث پیشنشانگری زلزله است و هیچ گونه اثری از زلزله ۲۰۱۰ تربت حیدریه در آن دیده نمی شود. از این رو، نیاز است از منطقهای بزرگ تر و با داده های بیشتر استفاده گردد. نمودار تغییرات زمانی پارامتر b در بخش باختری سامانه گسلی درونه در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



نشاندهنده انحراف استاندارد مقادير b-value مي باشند).

Figure 10. Temporal changes of the *b*-value in the middle part of the Doruneh fault (the dashed line shows the standard deviation of the *b*-value).



شکل ۱۱– تغییرات زمانی پارامتر b در بخش باختری گسل درونه (خطچینها نشاندهنده انحراف استاندارد مقادیر b-value میباشند).

Figure 11. Temporal changes of the *b*-value in the western part of the Doruneh fault (the dashed line shows the standard deviation of the *b*-value).

۵- نتیجهگیری

در این مطالعه از ۸۵۳ زمین لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از ۲/۷ استفاده شد. پارامترهای لرزه خیزی و تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزه خیزی در امتداد سامانه گسلی درونه واقع در شمال خاور ایران (محدوده طول جغرافیایی ۵۳/۹ تا ۶۱/۳ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه) با استفاده از کاتالوگ زلزله بهروز و کامل تحلیل و بررسی شد و مناطق لرزهای پر خطر مشخص شد. مهم ترین نتایج بهدست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

- تغییرات b-value در منطقه از ۸/۵۰ تا ۱/۲۵ می باشد، به طوری که قسمت های خاوری سامانه گسلی درونه دارای پارامتر b کمتر نسبت به قسمت های باختری آن است. - تغییرات a-value در منطقه از ۵/۸ تا ۷ است و لرزه خیزی به طور یکنواخت در امتداد سامانه گسلی درونه توزیع نشده است.

– پیشنشانگرهای زلزلههای بزرگ پیش از زلزلههای اصلی در نمودار تغییرات b نسبت به زمان در منطقه به خوبی قابل مشاهده است.

با توجه به این که پیشینی دقیق زلزله در حال حاضر یک مسئله علمی جهانی است، می توان با پایش دقیق مقدار *d* در هر منطقه از بروز خسارات جدی جلوگیری کرد. اما باید دقت داشت که تغییرات *d* پیش از زلزلههای بزرگ می تواند بسیار پیچیده باشد و تنها با استفاده از تغییرات *d* نمی توان زلزلهها را با موفقیت پیشینی کرد. برای پیشینی دقیق تر زلزله باید از مجموعهای از پیشنشانگرها به صورت همزمان استفاده کرد.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از پایاننامه کارشناسی ارشد نویسنده اول مقاله متعلق به دانشگاه شهید بهشتی تهران است. همچنین نگارندگان از نظرات و پیشنهادات سازنده و ارزنده سردبیر محترم و داوران محترم مجله علوم زمین مراتب تشکر و قدردانی را اعلام میدارند.

کتابنگاری

شیخالاسلامی، م.ر.، جوادی، ح.ر.، اسدی سرشار، م.، آقاحسینی، ا.، کوهپیما، م.، وحدتی دانشمند، ب.، ۱۳۹۲، دانشنامه گسلههای ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نشر رهی.

References

- Aki, K. ,1965. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula Log N=A-BM and Its Confidence Limits. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 43:237–39.
- Bender, B., 1983. Maximum Likelihood Estimation of b Values for Magnitude Grouped Data. Bulletin of the Seismological Society of America 73(3):831–51.
- Chen, J., and Zhu, Sh., 2020. Spatial and Temporal B-Value Precursors Preceding the 2008 Wenchuan, China, Earthquake (Mw = 7.9): Implications for Earthquake Prediction. Geomatics, Natural Hazards and Risk 11(1):1196–1211. doi: 10.1080/19475705.2020.1784297.
- El-Isa, Z. H., and Eaton, D. W., 2014. Spatiotemporal Variations in the B-Value of Earthquake Magnitude-Frequency Distributions: Classification and Causes. Tectonophysics 615–616:1–11. doi: 10.1016/j.tecto.2013.12.001.

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پار امترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۲۰۵۲، ۳۳ (۳)؛ ۸۵–۹۶

- Farbod, Y., Bellier, O., Shabanian, E., and Abbassi, M. R., 2011. Geomorphic and Structural Variations along the Doruneh Fault System (Central Iran). Tectonics 30(6).
- Fattahi, M., Walker, R. T., Khatib, M. M., Dolati, A., and Bahroudi, A., 2007. Slip-Rate Estimate and Past Earthquakes on the Doruneh Fault, Eastern Iran. Geophysical Journal International 168(2):691–709. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x.
- Goldstein, M. L., Morris, S. A., and Yen, G. G., 2004. Problems with Fitting to the Power-Law Distribution. European Physical Journal B 41(2):255–58. doi: 10.1140/epjb/e2004-00316-5.

Gutenberg, B., and Richter, C. F. 1944. Frequency of Earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America 34(4):185-88.

- Li, Q., 1978. Time and Space Scanning of the B-Value-a Method for Monitoring the Development of Catastrophic Earthquakes. Acta Geophys. Sinica 21:101–25.
- Main, I. 2000. Apparent Breaks in Scaling in the Earthquake Cumulative Frequency-Magnitude Distribution: Fact or Artifact?. Bulletin of the Seismological Society of America 90(1):86–97. doi: 10.1785/0119990086.
- McGuire, R. K., and Arabasz., W. J., 1990. An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Pp. 333–54 in Geotechnical an Environmental Geophysics: Volume I: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysicists.
- Mousavi, Z., Fattahi, M., Khatib, M., Talebian, M., Pathier, E., Walpersdorf, A., Sloan, R. A., Thomas, A. L., Rhodes, E., and Clive, F., 2021. Constant Slip Rate on the Doruneh Strike-Slip Fault, Iran, Averaged Over Late Pleistocene, Holocene, and Decadal Timescales. Tectonics 40(6):e2020TC006256.
- Nakaya, S. 2006. Spatiotemporal Variation in b Value within the Subducting Slab Prior to the 2003 Tokachi-Oki Earthquake (M 8.0), Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 111(3):1–13. doi: 10.1029/2005JB003658.
- Nava, F. A., Márquez-Ramírez, V. H., Zúñiga, F. R., Ávila-Barrientos, L., and Quinteros, C. B., 2017. Gutenberg-Richter b-Value Maximum Likelihood Estimation and Sample Size. Journal of Seismology 21(1):127–35. doi: 10.1007/s10950-016-9589-1.
- Newman, M. E. J., 2005. Power Laws, Pareto Distributions and Zipf's Law. Contemporary Physics 46(5): 323-51. doi: 10.1080/00107510500052444.
- Nuannin, P., Kulhanek, O., and Persson, L., 2005. Spatial and Temporal b Value Anomalies Preceding the Devastating off Coast of Sumatra Earthquake of December 26, 2004. Geophys. Res. Letters (11):1–4.
- Scholz, C. H., 1968. The Frequency-Magnitude Relation of Microfracturing in Rock and Its Relation to Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America 58(1):399–415. doi: 10.1785/bssa0580010399.
- Shahvar, M. P., Zare, M., and Castellaro, S., 2013. A Unified Seismic Catalog for the Iranian Plateau (1900-2011). Seismological Research Letters 84(2):233–49. doi: 10.1785/0220120144.
- Sheikholeslami, M, R., Javadi, H, R., Asadi Sarshar, M., Agha Hosseini, A., Koupeyma, M., Vahdati Daneshmand, B., 2014. Iran faults Encyclopedia, Geological Survey of Iran & Rahi publication. (In Persian).
- Shi, Y., and Bolt, B. A., 1982. The Standard Error of the Magnitude-Frequency b Value. Bulletin of the Seismological Society of America 72(5):1677–87.
- Tsukakoshi, Y., and Shimazaki, K., 2008. Decreased B-Value Prior to the M 6.2 Northern Miyagi, Japan, Earthquake of 26 July 2003. Earth, Planets and Space 60(9):915–24. doi: 10.1186/BF03352847.
- Utsu, T., 1965. A Method for Determining the Value of b in a Formula Log N= A= BM Showing the Magnitude Frequency Relation for Earthquakes. Geophys. Bull. Hokkaido Univ. 13:99–103.
- Wellman, H. W., 1966. Active Wrench Faults of Iran, Afghanistan and Pakistan. Geologische Rundschau55(3):716-35. doi: 10.1007/ BF02029650.
- Wiemer, S., 1996. Analysis of Seismicity: New Techniques and Case Studies. Dissertation Thesis, University of Alaska.
- Wiemer, S., and Wyss, M., 2000. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Bulletin of the Seismological Society of America 90(4):859–69. doi: 10.1785/0119990114.
- Wiemer, S., 2001. A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters 72(3):373-82. doi: 10.1785/gssrl.72.3.373.
- Wiemer, S., and Benoit, J.P., 1996. Mapping the B-value Anomaly at 100 Km Depth in the Alaska and New Zealand Subduction Zones. Geophysical Research Letters 23(13):1557–60.
- Wiemer, S., and Wyss, M., 1997. Mapping the Frequency-magnitude Distribution in Asperities: An Improved Technique to Calculate Recurrence Times?. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 102(B7):15115–28.
- Woessner, J., and Wiemer, S., 2005. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. Bulletin of the Seismological Society of America 95(2):684–98.

بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزهخیزی/محمدحسین تحریری و حمید صفاری/علوم زمین ۲۰۱۴، ۳۳ (۳): ۸۵–۹۶

- Wu, K. T., Yue, M. S., Wu, H. Y., Chao, S. L., Chen, H. T., Huang, W. Q., Tien, K. Y., and Lu, S. D., 1978. Certain Characteristics of the Haicheng Earthquake (M= 7.3) Sequence. Chinese Geophysics, AGU 1:289–308.
- Xie, Zh., Lyu, Y., and Li, X., 2022. Temporal and Spatial Changes in the B-Value Prior to the 2021 Luxian M S 6.0 Earthquake in Sichuan, China. Geomatics, Natural Hazards and Risk 13(1):934–48. doi: 10.1080/19475705.2022.2059019.
- Zöller, G., Hainzl, S., Kurths, J., and Zschau, J., 2002. A Systematic Test on Precursory Seismic Quiescence in Armenia. Natural Hazards 26(3):245–63. doi: 10.1023/A.

