

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 strike-slip 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):

$$\log \lambda_m = a - bM \quad (1)$$

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.

* 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

 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/>)

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_c). 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 b indicate 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

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.

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

محمدحسین تحریری^۱ و حمید صفاری^{۱*}

^۱ گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

چکیده

سامانه گسلی درونه با بیش از ۷۰۰ کیلومتر طول، پس از گسل اصلی زاگرس، به عنوان بزرگ‌ترین گسل ایران شناخته می‌شود. در این پژوهش، این سامانه گسلی به ۳ بخش اصلی تقسیم شده است زیرا سازوکار بخش‌های مختلف آن متفاوت است. بخش باختری دارای سازوکار امتدادلغز چپ‌بر با مولفه معکوس، بخش میانی امتدادلغز چپ‌بر و بخش خاوری با سازوکار معکوس گزارش شده است. در پژوهش حاضر، پارامترهای لرزه‌خیزی و تغییرات زمانی و مکانی آنها در امتداد این سامانه گسلی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای جمع‌آوری شده از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ میلادی و بر اساس روش بیشینه تمایل مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این راستا تغییرات زمانی پارامتر b و افت قابل توجه را نشان می‌دهد که نشانگر دو زلزله نسبتاً قوی تربت حیدریه در سال ۲۰۱۰ و زلزله فریمان در سال ۲۰۱۷ می‌باشد. به‌رغم این که هنوز جامعه علمی قادر به پیش‌بینی دقیق زمین‌لرزه نشده است، اما با توجه به روش مورد مطالعه و با پایش و تحلیل مستمر پارامترهای مختلف زمین‌لرزه به ویژه پارامتر b ، پیش‌یابی وقوع زمین‌لرزه‌های محتمل دور از انتظار نیست.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

گسل درونه

پارامترهای لرزه‌خیزی

توزیع مکانی

توزیع زمانی

لرزه‌خیزی

زلزله

۱- پیش‌نویس

امروزه بررسی توزیع فراوانی زلزله‌ها به‌صورت تابعی از بزرگای، 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:

$$\log \lambda_m = a - b m \quad (1)$$

در معادله ۱، که به معادله گوتنبرگ ریشتر کلاسیک شناخته می‌شود، a و b پارامترهای لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه و λ_m نیز نرخ وقوع زلزله‌ها در سال می‌باشند. پارامتر b رخداد نسبی زلزله‌های بزرگ و کوچک را نشان می‌دهد. روش گوتنبرگ ریشتر کلاسیک بازه‌ای نامتناهی از زلزله‌ها را شامل می‌شود ولی می‌دانیم رخداد زلزله با بزرگای بیش از حد بزرگ برای یک منطقه خاص غیرمنطقی است. برای مثال، با توجه به تاریخچه فعالیت سامانه گسلی درونه، سازوکار چیره و نرخ لغزش حدود ۲/۵ میلی‌متر در سال (Mousavi et al., 2021)، رخداد زلزله با بزرگای بیشتر از $M_w = 8.5$ در ناحیه مورد مطالعه دور از انتظار است (Farbod et al., 2011).

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 بزرگای هر منطقه، با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی آن تعریف می‌شود. بنابراین، مقدار بزرگای قابل قبول در محدوده‌ای بین کران انتخاب شده خواهد بود و رابطه گوتنبرگ-ریشتر دوکران‌دار به‌شکل زیر بیان می‌گردد (McGuire and Arabasz, 1990):

$$\lambda(m) = \lambda(m_0) \frac{\exp(-\beta(m - m_0)) - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))}{1 - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0))} \quad \text{for } m_0 \leq m \leq m_{\max} \quad (2)$$

در رابطه ۲، پارامتر β نسبت بین زلزله‌های بزرگ و کوچک را بیان می‌کند و $\lambda(m)$ نرخ وقوع زلزله‌های با بزرگای برابر یا بیشتر از m در سال است. همچنین m_0 و $m_{\max}$ نشان‌دهنده آستانه بالا و پایین بزرگای در منطقه مورد مطالعه است. اغلب کران پایین در محدوده ۴ تا ۴/۵ انتخاب می‌شود زیرا زلزله‌های کمتر از این

* نویسنده مسئول: حمید صفاری؛ 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>

doi: 10.22071/gsj.2023.387658.2068

doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.6.7

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



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

مقدار به‌ندرت می‌تواند خسارات مهمی ایجاد کنند.

مطالعات نشان می‌دهند مقدار پارامتر b در طول زمان و مکان متغیر است (Wiener and Benoit, 1996; Wiener and Wyss, 1997). همچنین، پارامتر b گاهی اوقات زلزله‌های بزرگ آینده را پیش‌بینی می‌کند. به‌عنوان مثال، پارامتر b در پیش‌لرزه‌های پیش از زلزله اصلی هایچنگ (Haicheng) در شمال خاوری کشور چین در سال ۱۹۷۵ به ۰/۶ رسیده بود (Wu et al., 1978). همچنین لی (Li, 1978) دریافت که پارامتر b پیش از زلزله اصلی معمولاً سه مرحله را طی می‌کند: در مرحله اول کمی افزایش می‌یابد سپس یک افت ناگهانی و در مرحله آخر و درست پیش از زلزله اصلی، پارامتر b افزایش می‌یابد.

کاهش مقدار پارامتر b نشان‌دهنده افزایش تنش پیش از یک زلزله بزرگ می‌باشد (Schilz, 1968). در سال ۲۰۰۶ ناکایا (Nakaya, 2006) نشان داد مقدار پارامتر b پیش از وقوع زلزله سال ۲۰۰۳ توکاجی-اوکی (Tokachi-Oki) ژاپن به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. همچنین، کاهش پارامتر b پیش از زلزله سال ۲۰۰۳ میاگی (Miyagi) ژاپن با بزرگای ۶/۲ نیز اتفاق افتاده است (Tsukakoshi and Shimazaki, 2008). به‌ویژه نوانین (Nuannin et al., 2005) دریافت که افت شدید پارامتر b می‌تواند مربوط به زمان وقوع دو زلزله با بزرگای ۷ در سال ۲۰۰۲ و بزرگای ۹ در سال ۲۰۰۴ در ایسلند باشد. چن و ژو (Chen and Zhu, 2020) با بررسی پارامتر b پیش از زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان (Wenchuan) چین ضمن ارائه مفاهیم جدیدی برای پیش‌بینی زلزله نشان دادند پارامتر b پیش از رخداد ونچوان افت کرده است. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۲ تغییرات مکانی و زمانی پارامتر b بررسی و نشان داده شد پیش از زلزله سیچوان (Sichuan) چین پارامتر b تغییرات قابل توجهی داشته است (Xie et al., 2022). در نتیجه، پارامتر b می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر مهم زلزله 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. اندازه‌گیری کمی این توانایی نیاز به محاسبه پارامتر کمینه بزرگای کامل بودن زلزله‌ها (M_c) 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.

روش‌هایی که معمولاً برای محاسبه پارامتر b استفاده می‌شوند، شامل روش بیشینه تمایل (Aki, 1965; Shi and Bolt, 1982; Utsu, 1965) و روش کمینه مربعات (Main, 2000; Zoller et al., 2002) می‌باشد. روش بیشینه تمایل سهم هر رویداد لرزه‌ای را یکسان در نظر می‌گیرد و بزرگای تمام زمین‌لرزه‌های با وزن یکسان را به‌طور میانگین محاسبه می‌کند. در مقایسه با روش بیشینه تمایل، روش حداقل مربعات، وزن بیشتری را برای زمین‌لرزه‌های کوچک و متوسط در نظر می‌گیرد (Xie et al., 2022). تعداد زیادی از مطالعات (Goldstein et al., 2004; Nava et al., 2017; Newman, 2005) نشان داده‌اند که انحراف استاندارد روش بیشینه تمایل بیش از دو برابر روش حداقل مربعات است. زمانی که کاتالوگ لرزه‌ای کوچک باشد، روش بیشینه تمایل تخمین دقیق‌تری 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 (Aki, 1965; Bender, 1983; Utsu, 1965):

$$b = \frac{1}{\bar{M} - M_{\min}} \log e \quad (3)$$

در رابطه ۳، $\bar{M}$ بزرگای متوسط زلزله‌های موجود در کاتالوگ زلزله و $M_{\min}$ حداقل بزرگای است. انحراف معیار پارامتر b نیز توسط فرمول ۴ قابل محاسبه است (Shi and Bolt, 1982):

$$\sigma_b = 2.3b^2 \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 / n(n-1)} \quad (4)$$

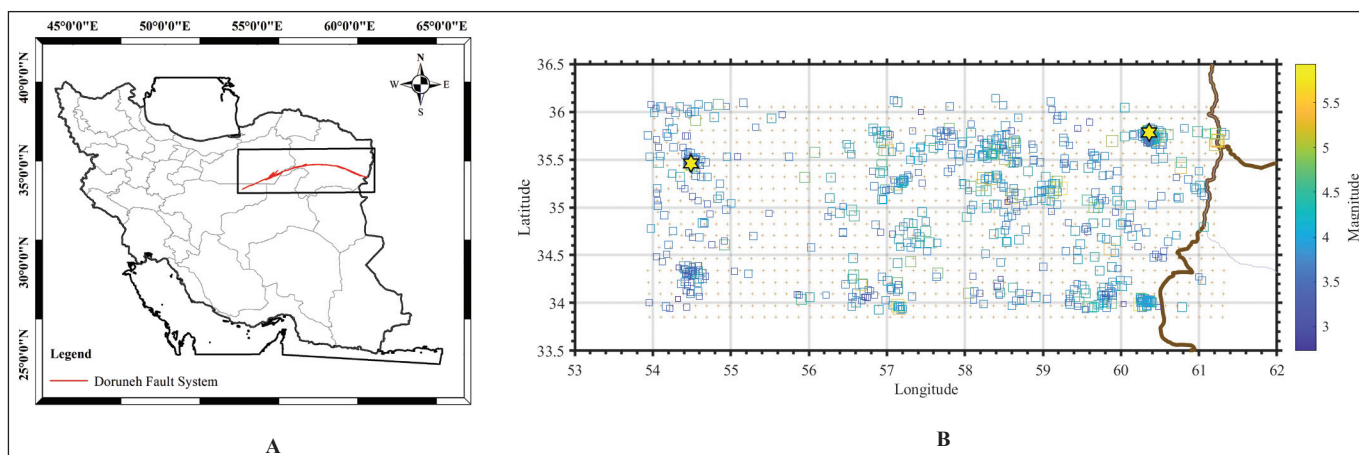
در رابطه ۴، n تعداد کل زلزله‌های اتفاق افتاده در منطقه، $\bar{M}$ بزرگای متوسط زلزله‌های موجود در کاتالوگ و M_i بزرگای زلزله i ام است. برای تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای از نرم‌افزار Zmap7 (Wiener, 2001; Wiener and Wyss, 2000) استفاده شد. این نرم‌افزار، تحت نرم‌افزار متلب اجرا می‌شود و برای استفاده عموم به‌طور رایگان قرار داده شده است.

۳- 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 می‌شود (Fattahi et al., 2007). گسل درونه یکی از گسل‌های بزرگ ایران است که از مرز خاوری ایران تا مرکز دشت کویر به طول بیش از ۷۰۰ کیلومتر امتداد دارد (Mousavi et al., 2021). با توجه به شکل خمیده این گسل (شکل ۱) می‌توان آن را به ۳ بخش کلی تقسیم کرد: الف) بخش خاوری گسل درونه از مرز افغانستان تا شهرستان تربت‌حیدریه ادامه دارد، شاخه‌ای از بخش خاوری گسله جدا شده و به داخل کشور افغانستان کشیده می‌شود. ب) بخش مرکزی از تربت‌حیدریه تا حوالی روستای انابد و ج) بخش باختری از انابد تا انارک ادامه دارد (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲). سازوکار بخش باختری گسل به‌صورت امتدادلغز چپ‌بر با مولفه معکوس، بخش مرکزی امتدادلغز چپ‌بر بدون مولفه معکوس و ناحیه خاوری به‌صورت معکوس می‌باشد (Farbod et al., 2011).

کاتالوگ زلزله یکی از مهم‌ترین منابع داده در مطالعات مختلف مربوط به لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل خطر زلزله می‌باشد. تهیه کاتالوگ دقیق و کامل از زمین‌لرزه‌ها گامی مهم در تعیین فعالیت لرزه‌ای یک منطقه معین است. در پژوهش حاضر، از ۸۵۳ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از ۲/۷ در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. داده‌های زمین‌لرزه 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 زمین‌لرزه‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استخراج شد (شکل ۱). این کاتالوگ خود شامل منابع مختلفی مانند ISC, EHB, MOS, MEA, NEIC, IIEES و NAB می‌باشد.

شبکه‌های مختلف لرزه‌نگاری در سرتاسر جهان، روش‌های متفاوتی برای گزارش پارامترهای زلزله به‌کار می‌برند. این موضوع سبب ناهماهنگی پارامترهای موجود در گزارش‌ها می‌شود. از این رو، گام دیگر در این مطالعه، شناسایی الگوریتم‌های ثبت و تعیین مشخصات زلزله‌ها و مقیاس بزرگای آنها است. در این مطالعه، جهت یکسان‌سازی واحد بزرگا و برای تبدیل واحدهای ارائه شده در کاتالوگ به بزرگای گشتاوری از روابط ارائه شده توسط شاهوار و همکاران (Shahvar et al., 2013) که مخصوص فلات ایران است، استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۱- A) محدوده مورد مطالعه با طول جغرافیایی ۵۳/۹ تا ۶۱/۳ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه و B) زمین‌لرزه‌های ثبت شده در منطقه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ (ستاره‌های زرد نشان‌دهنده زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از $M_w=5.8$ می‌باشند).

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 : $M_w \leftarrow -0.589(\pm 0.012)M_s + 2.420(\pm 0.055)$	0.872	0.145
ISR : $M_s \leftarrow -1.483(\pm 0.029)M_w - 2.996(\pm 0.152)$	0.678	0.230
OR : $M_w = 0.611(\pm 0.010)M_s + 2.314(\pm 0.047)$	0.871	0.124
Regression Relation between M_s and M_w ($M_s \geq 6.1$)		
SR : $M_w \leftarrow -0.887(\pm 0.047)M_s + 0.656(\pm 0.316)$	0.862	0.171
ISR : $M_s \leftarrow -1.004(\pm 0.043)M_w + 0.072(\pm 0.285)$	0.848	0.179
OR : $M_w = 0.949(\pm 0.029)M_s + 0.243(\pm 0.192)$	0.858	0.126
Regression Relation between m_b and M_w , Alborz-Central Iran Region		
SR : $M_w \leftarrow -1.107(\pm 0.052)m_b + 0.117(\pm 0.273)$	0.780	0.213
ISR : $m_b \leftarrow -0.665(\pm 0.034)M_w + 1.556(\pm 0.186)$	0.860	0.207
OR : $M_w = 1.303(\pm 0.034)m_b - 1.292(\pm 0.178)$	0.759	0.153
Regression Relation between m_b and M_w , Zagros Region		
SR : $M_w \leftarrow -0.917(\pm 0.023)m_b + 0.507(\pm 0.115)$	0.796	0.341
ISR : $m_b \leftarrow -0.869(\pm 0.022)M_w + 0.568(\pm 0.111)$	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_L and M_w		
SR : $M_w \leftarrow -0.701(\pm 0.036)M_L + 1.656(\pm 0.176)$	0.793	0.190
ISR : $M_L \leftarrow -1.138(\pm 0.059)M_w - 0.904(\pm 0.296)$	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 : $M_L \leftarrow -0.921(\pm 0.012)M_N + 0.125(\pm 0.044)$	0.849	0.19
ISR : $M_N \leftarrow -0.922(\pm 0.012)M_L + 0.432(\pm 0.042)$	0.848	0.19
OR : $M_L = 0.999(\pm 0.009)M_N - 0.160(\pm 0.032)$	0.842	0.137
Regression Relation between M_N and M_L , Zagros Region		
SR : $M_L \leftarrow -0.945(\pm 0.009)M_N + 0.123(\pm 0.032)$	0.871	0.181
ISR : $M_N \leftarrow -0.922(\pm 0.009)M_L + 0.350(\pm 0.030)$	0.875	0.179
OR : $M_L = 1.014(\pm 0.006)M_N - 0.123(\pm 0.023)$	0.867	0.13
Regression Relation between m_b and 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 m_b and M_s , Zagros Region		
SR : $M_s \leftarrow -1.071(\pm 0.021)m_b - 0.866(\pm 0.095)$	0.846	0.414
ISR : $m_b \leftarrow -0.606(\pm 0.012)M_s + 2.081(\pm 0.047)$	0.801	0.311
OR : $M_s = 1.420(\pm 0.013)m_b - 2.415(\pm 0.060)$	0.579	0.26
The chosen regression for each magnitude couple is shown in bold		
*rms, 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).

تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی در امتداد سامانه گسلی درون واقع در شمال خاوری ایران، همچنین ارتباط دادن پیش‌یابی 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 زلزله‌ها نسبت به بزرگای جهت به‌دست آوردن پارامترهای لرزه‌خیزی منطقه توسط نرم‌افزار Zmap7 انجام شد. نمودار بزرگای- فراوانی محدوده مورد مطالعه در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۴، مقدار پارامتر b منطقه 0.80 ، پارامتر a ، 5.630 و مقدار کمینه بزرگای کامل بودن زلزله در منطقه 3.6 می‌باشد. بزرگای کاملی زلزله طبق تعریف کوچک‌ترین بزرگای زلزله است که تمام زلزله‌های بزرگ‌تر از آن در ناحیه توسط دستگاه‌های لرزه‌نگاری ثبت می‌شوند (Wiemer and Wyss, 2000).

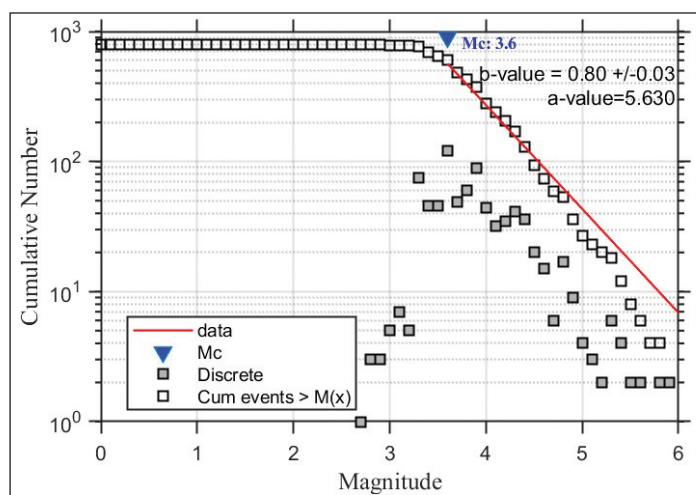
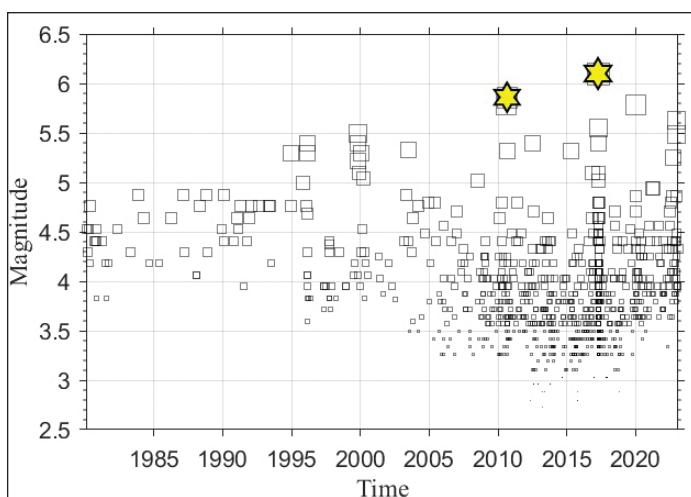
شکل ۳- نمودار بزرگای- زمان در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳ (ستاره‌های زرد نشان‌دهنده زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از $M_w=5.8$ می‌باشند).

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

در مجموع، از ۸۵۳ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از $2/7$ در این مطالعه استفاده شد. بزرگ‌ترین زلزله‌های رخ داده در باز زمانی مورد مطالعه، مربوط به زلزله ۱۲۷ گوست سال ۲۰۱۰ تربت حیدریه با بزرگای گشتاور $5/9$ و زلزله ۵ آوریل ۲۰۱۷ در فریمان با بزرگای گشتاور $6/1$ و ژرفای ۱۰ کیلومتری زمین می‌باشد. رومرکز این زمین‌لرزه در ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت جام و ۸۶ کیلومتری مشهد قرار داشت. بیشینه شتاب ایجاد شده توسط این زمین‌لرزه در سفیدسنگ حدود $0.04g$ ، فریمان حدود $0.07g$ ، تربت جام حدود $0.06g$ و مشهد حدود $0.04g$ گزارش شد. نمودار بزرگای- 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 بزرگای- زمان منطقه مورد مطالعه، قابلیت تشخیص زلزله‌ها از سال ۲۰۰۵ به دلیل افزایش رویدادهای کوچک ثبت شده، به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است (شکل ۳).

۴-۲ بحث

پژوهش حاضر به منظور به‌دست آوردن پارامترهای لرزه‌خیزی و بررسی



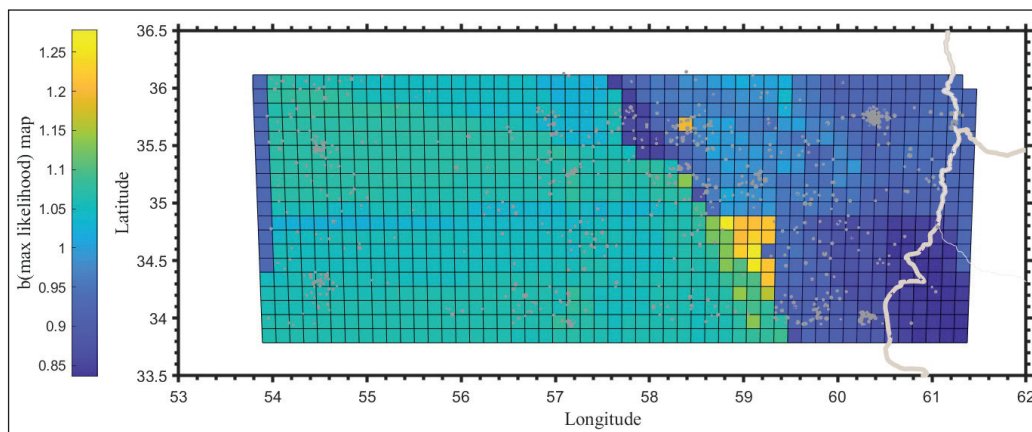
شکل ۴- نمودار بزرگای- فراوانی محدوده مورد مطالعه (مربع‌های سفید نشان‌دهنده توزیع تجمعی رویدادها و مربع‌های خاکستری نشان‌دهنده رویدادهای تجمیع نشده است).

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

۲-۴- تغییرات مکانی پارامترهای لرزه‌خیزی

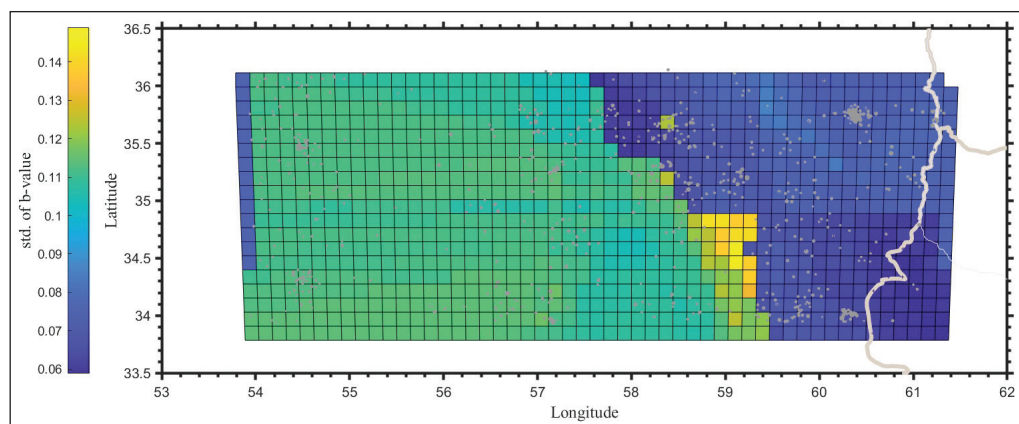
تحمل می‌کنند. این انباشت متفاوت تنش، به دوره بازگشت‌های متفاوت زلزله‌ها در بخش‌های مختلف این سامانه گسلی می‌انجامد. با استفاده از روش معرفی شده در بخش پیشین، تغییرات مکانی انحراف معیار b به دست آمد (شکل ۶). این مقدار، در کل گستره مورد مطالعه، به جز بخش کوچکی کمتر از ۰/۱۲ می‌باشد. نقشه تغییرات مکانی پارامتر a (شکل ۷) نشان می‌دهد رویدادها به صورت یکنواخت در منطقه مورد مطالعه توزیع نشده‌اند. مقادیر بیشتر a نشان‌دهنده لرزه‌خیزی بیشتر ناحیه است. تغییرات این پارامتر از ۵/۸ تا ۷ می‌باشد.

تهیه و بررسی نقشه مقدار پارامتر b اطلاعات بسیار مهمی را درباره فعالیت لرزه‌ای یک ناحیه ارائه می‌دهد. بدین منظور، جهت بررسی تغییرات محلی مقادیر ضرایب لرزه‌خیزی a و b ، نقشه‌های توزیع مکانی ضرایب لرزه‌خیزی با استفاده از روش ویمر (Wiemer, 1996) در نرم‌افزار Zmap7 محاسبه شد. نقشه تغییرات مکانی b -value (شکل ۵) نشان‌دهنده تغییرات این پارامتر از ۰/۸۵ تا ۱/۲۵ می‌باشد. این نقشه بیانگر توزیع تنش در منطقه مورد مطالعه است، به گونه‌ای که مقادیر کم b نواحی هستند که تنش زیادی را تحمل می‌کنند و مقادیر زیاد b نواحی هستند که تنش کمی را



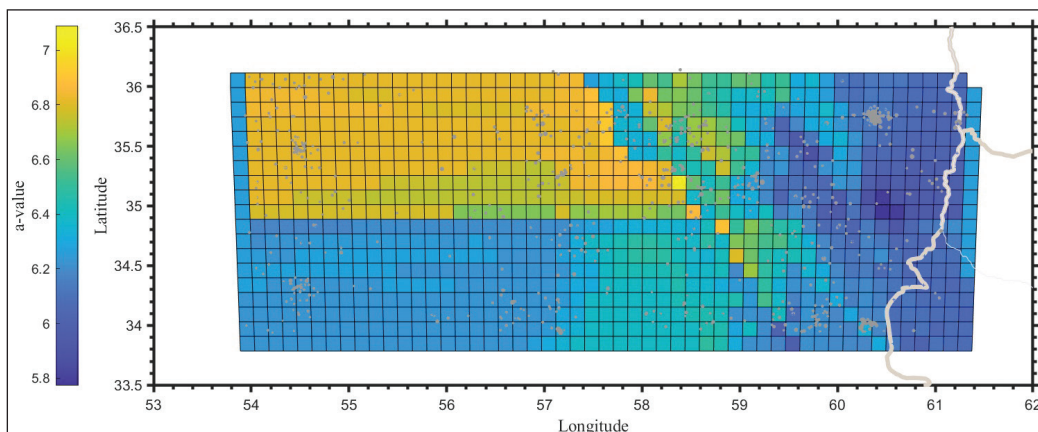
شکل ۵- تغییرات مکانی پارامتر b در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳.

Figure 5. Spatial changes of b -value in the study area from January 1, 1980, to February 17, 2023.



شکل ۶- تغییرات مکانی انحراف معیار پارامتر b در محدوده مورد مطالعه از تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۸۰ تا تاریخ ۱۷ فوریه ۲۰۲۳.

Figure 6. Spatial changes of the standard deviation of b -value in the studied 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.

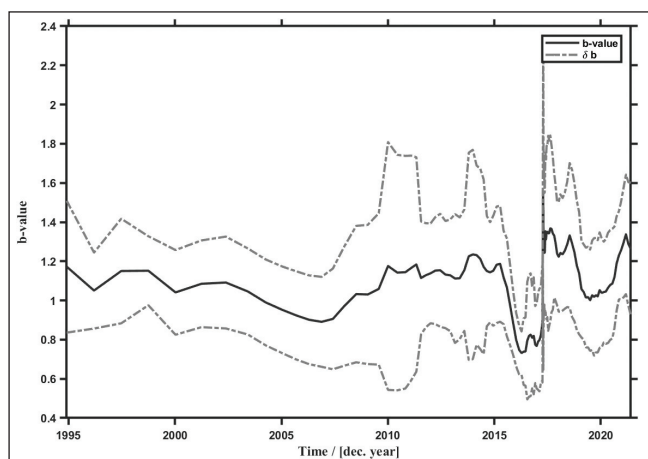
Figure 7. Spatial changes of a -value in the studied area from January 1, 1980, to February 17, 2023.

۳-۴- 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 b پیش و پس از سال ۲۰۱۰ همچنین پیش و پس از سال ۲۰۱۷ معنی‌دار بود. با بررسی‌های بیشتر منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که افت پارامتر b در سال ۲۰۱۰ مربوط به زلزله ۵/۹ تربت‌حیدریه (ستاره شماره ۱) و افت شدید پارامتر b در سال ۲۰۱۷ مربوط به زلزله فریمان (ستاره شماره ۲) با بزرگای گشتاور ۶/۱ می‌باشد. رخداد پیش‌لرزه ممکن است به کاهش جزئی پارامتر b چند روز پیش از زلزله اصلی بیانجامد. فعالیت پس‌لرزه نیز منجر به تغییرات بیشتر در مقدار b -value می‌شود (El-Isa and Eaton, 2014). به منظور بررسی دقیق‌تر پیش‌نشانگر b -value در منطقه، این ناحیه به سه زیرمنطقه

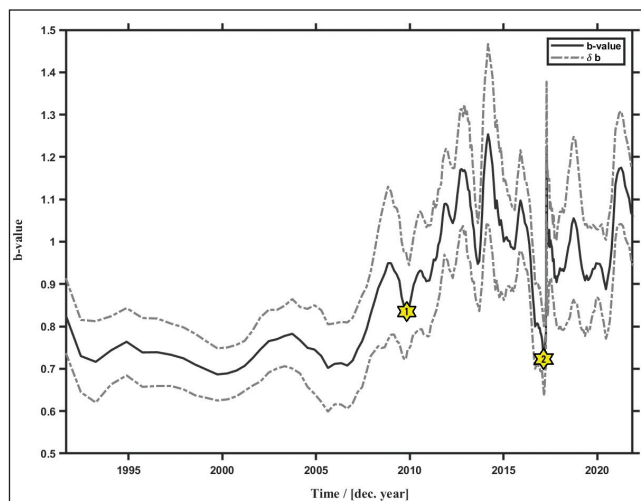
تقسیم شد: الف) بخش باختری با طول جغرافیایی ۵۳/۹ تا ۵۶/۴ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه، ب) بخش میانی با طول جغرافیایی ۵۶/۴ تا ۵۸/۹ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه، ج) بخش خاوری با طول جغرافیایی ۵۸/۹ تا ۶۱/۳ و عرض جغرافیایی ۳۳/۹ تا ۳۶/۱ درجه. هر کدام از این زیرمنطقه‌ها دربردارنده قطعات باختری، میانی و خاوری گسل درونه می‌باشند. با توجه به کمتر بودن زلزله‌های هر زیرمنطقه نسبت به منطقه اصلی، اندازه پنجره برای محاسبه تغییرات زمانی پارامتر b ۵۰ رویداد با همپوشانی ۴٪ استفاده شد.

تغییرات زمانی b -value در بخش خاوری منطقه مورد مطالعه (شکل ۹)، روند تقریباً 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 ۰/۷ به سرعت کاهش یافته است. این افت شدید پارامتر b و سپس افزایش آن می‌تواند 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 ۹- تغییرات زمانی پارامتر b در بخش خاوری گسل درونه (خط‌چین‌ها نشان‌دهنده انحراف استاندارد مقادیر b -value می‌باشند).

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

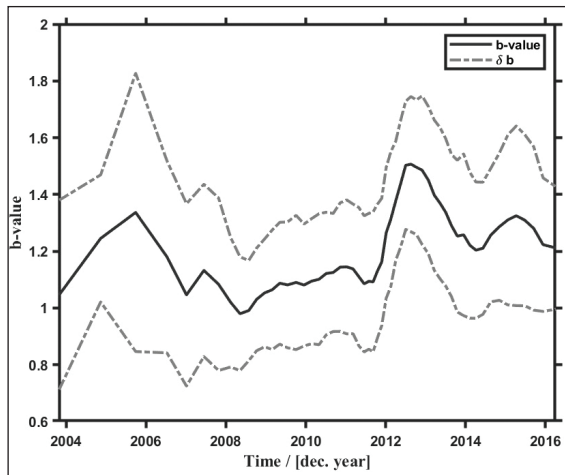


شکل ۸- تغییرات زمانی پارامتر b در محدوده مورد مطالعه طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳ (ستاره‌های زرد نشان‌دهنده زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵/۸ در منطقه مورد مطالعه و خط‌چین‌ها نشان‌دهنده انحراف استاندارد مقادیر b -value می‌باشند).

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).

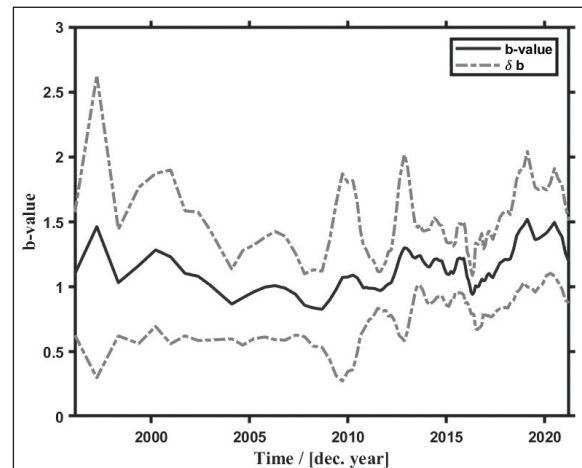
پارامتر b در طول زمان فاقد دقت کافی و غیر قابل بهره‌برداری جهت استفاده در بحث پیش‌نشانگری زلزله است و هیچ گونه اثری از زلزله ۲۰۱۰ تربت حیدریه در آن دیده نمی‌شود. از این رو، نیاز است از منطقه‌ای بزرگ‌تر و با داده‌های بیشتر استفاده گردد. نمودار تغییرات زمانی پارامتر b در بخش باختری سامانه گسلی درونه در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

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



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).



شکل ۱۰- تغییرات زمانی پارامتر b در بخش میانی گسل درونه (خطچین‌ها نشان‌دهنده انحراف استاندارد مقادیر b -value می‌باشند).

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).

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به این که پیش‌بینی دقیق زلزله در حال حاضر یک مسئله علمی جهانی است، می‌توان با پایش دقیق مقدار b در هر منطقه از بروز خسارات جدی جلوگیری کرد. اما باید دقت داشت که تغییرات b پیش از زلزله‌های بزرگ می‌تواند بسیار پیچیده باشد و تنها با استفاده از تغییرات b نمی‌توان زلزله‌ها را با موفقیت پیش‌بینی کرد. برای پیش‌بینی دقیق‌تر 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.

در این مطالعه از ۸۵۳ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاور بیشتر از ۲/۷ استفاده شد. پارامترهای لرزه‌خیزی و تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی 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. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

- تغییرات b -value در منطقه از ۰/۸۵ تا ۱/۲۵ می‌باشد، به‌طوری که قسمت‌های خاوری سامانه گسلی درونه دارای پارامتر b کمتر نسبت به قسمت‌های باختری آن است.
- تغییرات a -value در منطقه از ۵/۸ تا ۷ است و لرزه‌خیزی به‌طور 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.

کتابنگاری

شیخ‌الاسلامی، م.ر.، جواد، ح.ر.، اسدی‌سرشار، م.، آقاسینی، ا.، کوه‌پیمای، م.، وحدتی دانشمند، ب.، ۱۳۹۲، دانشنامه گسله‌های ایران، سازمان زمین‌شناسی 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.

- 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 and 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 $\log N = A - B M$ 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 Rundschau* 55(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.

- 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.