



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

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

Spatial and temporal variation in b-value and z-value of magnitude-frequency earthquake distribution in Urmia region, North-West part of Iran

Azra Sharifi¹ | Arezou Dorostian² | Mehdi Zare^{3*} | Majid Mahood⁴ | Soheila Bouzari⁵

1. Phd Student in Geophysics (seismological orientation) of Islamic Azad University of North Tehran, Tehran, Iran. E-mail: azra.sharifiii@iau.ac.ir
2. Department of Geophysics, Division of Seismology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: arezou.dorostian@iau.ac.ir
3. Corresponding Author, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran. E-mail: mzare@iiees.ac.ir
4. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran. E-mail: m.mahood@iiees.ac.ir
5. Department of Geophysics, Division of Seismology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran. E-mail: s_tectonic@iau-tnb.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 11 June 2026
Revised: 28 June 2026
Accepted: 30 June 2026
Published: 11 July 2026

Keywords:
Urmia,
Seismicity parameters,
Gutenberg–Richter relationship,
Seismotectonic,
Seismic hazard assessment.

ABSTRACT

This study aims to quantify seismicity parameters and characterize the spatiotemporal evolution of earthquake activity in Northwestern Iran (35°–39° N, 44°–47° E), a region of significant seismotectonic importance due to its active fault systems. Utilizing the Iranian Seismological Center (IRSC) catalog for the period 2006–2025, we determined the magnitude of completeness ($M_c=1.9$) and calculated the b-value using the Gutenberg–Richter relationship. Furthermore, Z-value statistical mapping was employed to identify anomalies in seismic activity rates. The analysis yielded a b-value of 0.79 ± 0.01 , suggesting a relatively higher probability of large-magnitude seismic events in the region. Spatiotemporal assessment revealed that sectors surrounding Lake Urmia, particularly the western and southern margins, exhibit positive Z-values, indicating seismic quiescence and potential stress accumulation. Conversely, regions intersecting major fault systems, such as the Tabriz and Sofian faults, demonstrate negative Z-values, reflecting persistent seismic activity. Additionally, the analysis of seismic energy release from 2006 to January 2025 identifies the 2012 East Azerbaijan earthquake ($M_w=6.5$) as the most significant seismic event of this period. The observed seismic quiescence surrounding Lake Urmia, coupled with localized stress accumulation indicators, highlights a heightened potential for future seismic ruptures. These findings provide critical evidence for refining seismic hazard assessments and developing more accurate regional earthquake forecasting models in Northwestern Iran.

Cite this article: Sharifi, A.; Dorostian, A.; Zare, M.; Mahood, M. & Bouzari, S. (2026). Spatial and temporal variation in b-value and z-value of magnitude-frequency earthquake distribution in Urmia region, North-West part of Iran. *Environmental Hazards Management*, 13 (1), 53-66. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.416318.943>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.416318.943>

Introduction

her Iranian plateau is characterized by high seismicity driven by complex active tectonics, particularly in the Northwestern region. Addressing a gap in integrated seismic analysis for the Lake Urmia zone, this study employs a multi-parameter framework—incorporating b-values, Z-values, and seismic energy release—to analyze IRSC catalog data (2006–2025), thereby elucidating spatiotemporal seismic dynamics and refining regional seismic hazard assessment.

Materials and method

This observational study analyzes seismic activity using secondary instrumental data from the Iranian Seismological Center (IRSC). The dataset comprises >22000 events ($0.5 \leq M_w \leq 6$) recorded between January 2006 and September 2025 in the Lake Urmia region. The catalog includes 52 events with $M \geq 4.5$ and 24 events with $M \geq 5$. Spatial mapping and statistical computations were performed using ZMAP, MATLAB, ArcGIS, and Surfer. Fault structures and seismic distributions were integrated to assess regional seismotectonic behavior. The b-value and its uncertainty (δb) were estimated using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) (Aki, 1965, 1984) based on the Gutenberg–Richter law. To ensure unbiased results, the Magnitude of Completeness (M_c) was determined as the threshold for a 100% detection rate within the catalog. Statistical Rate Changes: The Z-value analysis was employed to quantify spatiotemporal variations in seismicity rates. This method allowed for the identification of statistically significant periods of seismic quiescence or activation by comparing mean seismicity rates and their standard deviations. Cumulative seismic energy release was calculated for four five-year intervals using the moment magnitude (M_w) relationship ($\log E = 4.8 + 1.5M_w$). This facilitated the mapping of stress release patterns and the evaluation of regional rupture processes over time.

Conclusion

The statistical analysis of the Lake Urmia region yields a magnitude of completeness (M_c) of 1.9, which, despite a temporary increase during the 2012 Varzaghan sequence due to network saturation, has stabilized in recent years to ensure catalog reliability. The calculated mean b-value of 0.79 is significantly lower than the global average, indicating high tectonic stress and active crustal deformation across the study area. Spatio-temporal Z-value analysis identifies distinct positive anomalies (seismic quiescence) along the North Tabriz and Tasuj faults, which, combined with localized b-value decreases, suggests significant strain energy accumulation. Furthermore, the cumulative seismic energy release exhibits a step-like pattern, showing a marked decline in the northern and northeastern sectors; specifically, $\log E$ values have dropped from a peak of 21.2 (2010–2015) to approximately 13.6 in the 2020–2025 period. This pronounced quiescence in the north, contrasted with the dispersed micro-seismicity in the southern and southwestern sectors, strongly supports the hypothesis of intensified stress accumulation on the faults north of Lake Urmia, potentially signaling a preparation phase for future seismic events.

Authors Contributions

The authors' contributions to the present study are as follows:

First author: Data collection and analysis, conducting the research, and drafting the initial manuscript.

Second and third authors: Supervision, editing, revision, and validation of the results.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgments

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided from data fabrication and falsification.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



تغییرات مکانی و زمانی مقدار b و مقدار Z در توزیع فراوانی- بزرگی زمین‌لرزه‌ها در منطقه ارومیه، شمال غرب ایران

عذرا شریفی^۱ | آرزو درستیان^۲ | مهدی زارع^۳ | مجید معهود^۴ | سهیلا بوذری^۵

۱. گروه ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران. رایانامه: azra.sharifiii@iau.ac.ir

۲. گروه ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران. رایانامه: arezou.dorostian@iau.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. رایانامه: mzare@iiees.ac.ir

۴. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. رایانامه: m.mahood@iiees.ac.ir

۵. گروه ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران. یارانامه: s_tectonic@iau-tnb.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف کمی‌سازی پارامترهای لرزه‌خیزی و تبیین تحول زمانی- مکانی فعالیت زمین‌لرزه‌ها در شمال غرب ایران، در محدوده ۳۵ درجه تا ۳۹ درجه عرض شمالی و ۴۴ درجه تا ۴۷ درجه طول شرقی انجام گرفت؛ منطقه‌ای که به دلیل وجود سامانه‌های گسلی فعال، از نظر مخاطرات لرزه‌ای اهمیت زیادی دارد. با استفاده از کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC) در دامنه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵، مقدار بزرگی کامل بودن کاتالوگ ($M_c = 1/9$) محاسبه شد و مقدار b -value بر اساس رابطه گوتنبرگ-ریشتر به دست آمد. همچنین برای شناسایی ناهنجاری‌های نرخ لرزه‌خیزی، از تحلیل آماری Z -value استفاده شد. تحلیل‌ها نشان داد که مقدار b -value برابر با 0.1 ± 0.079 است که بیانگر احتمال به نسبت بیشتر رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در منطقه است. ارزیابی زمانی- مکانی نشان داد که نواحی پیرامون دریاچه ارومیه، به ویژه حاشیه‌های غربی و جنوبی، دارای مقادیر مثبت Z -value هستند که نشان‌دهنده سکون لرزه‌ای و احتمال تجمع تنش است. در مقابل، نواحی منطبق بر گسل‌های اصلی مانند گسل تبریز و صوفیان، مقادیر منفی Z -value و فعالیت لرزه‌ای پایدار را نشان می‌دهند. افزون‌بر این، تحلیل آزادسازی انرژی لرزه‌ای در دوره ۲۰۰۶ تا ژانویه ۲۰۲۵ نشان داد که زمین‌لرزه آذربایجان شرقی در سال ۲۰۱۲ با بزرگای $M_w = 6/5$ ، مهم‌ترین رویداد لرزه‌ای این بازه بوده است. سکون لرزه‌ای مشاهده‌شده در پیرامون دریاچه ارومیه، همراه با شاخص‌های موضعی تجمع تنش، نشان‌دهنده پتانسیل زیاد رخداد شکست‌های لرزه‌ای در آینده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در بهبود ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای و توسعه مدل‌های دقیق‌تر پیش‌بینی زمین‌لرزه در شمال غرب ایران مؤثر باشد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

کلیدواژه:

ارومیه

پارامترهای لرزه‌خیزی

رابطه گوتنبرگ-ریشتر

لرزه‌زمین‌ساخت

مخاطرات لرزه‌ای.

استناد: شریفی، عذرا؛ درستیان، آرزو؛ زارع، مهدی؛ معهود، مجید و بوذری، سهیلا (۱۴۰۴). تغییرات مکانی و زمانی مقدار b و مقدار Z در توزیع فراوانی- بزرگی زمین‌لرزه‌ها در منطقه ارومیه، شمال غرب ایران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۳ (۱)، ۵۳-۶۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.416318.943>

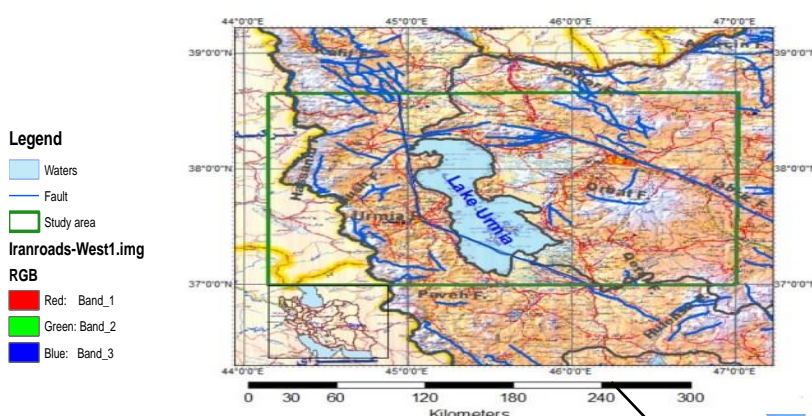
© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2026.416318.943>



مقدمه

زمین لرزه یکی از مهم‌ترین فرایندهای پویا در سامانه زمین‌ساختی و بیانگر آزادسازی تنش در پوسته زمین است. فلات ایران به دلیل قرارگیری در کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا و همگرایی فعال صفحه عربی با صفحه اوراسیا، از مناطق لرزه‌خیز جهان به شمار می‌رود؛ به گونه‌ای که نرخ همگرایی حدود ۲۲ میلی‌متر در سال موجب تمرکز تنش‌های پوسته‌ای و وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد در این پهنه شده است (بربریان و بربریان، ۱۹۸۱). در این میان، شمال غرب ایران و محدوده پیرامون دریاچه ارومیه بخشی از ایالت لرزه‌زمین‌ساختی البرز- آذربایجان معرفی شده و وجود گسل‌های فعالی مانند گسل شمال تبریز، سلماس و صوفیان نقش اساسی در کنترل الگوی لرزه‌خیزی منطقه دارند (میرزایی و همکاران، ۱۳۷۷؛ توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۳۷۸؛ کریمی پریدری و همکاران، ۱۳۹۲). افزون بر این، دریاچه ارومیه به‌عنوان یک حوضه پیش‌کمانی مرتبط با همگرایی مایل صفحه عربی با ریزصفحه ایران مرکزی تفسیر شده و شواهد زمین‌شناسی بیانگر تداوم فعالیت نئوتکتونیک در این پهنه است (علوی، ۱۳۷۰). در مطالعات لرزه‌شناسی، رابطه فراوانی- بزرگای گوتنبرگ-ریشتر چارچوبی آماری برای توصیف رفتار لرزه‌ای ارائه می‌دهد که در آن پارامتر b به شرایط تنش، ناهمگنی محیط سنگی و سبک گسلش وابسته است و به‌طور گسترده برای تحلیل وضعیت تنش و پتانسیل لرزه‌زایی مناطق مختلف به کار می‌رود (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۴۹). برآورد دقیق این پارامتر مستلزم تعیین بزرگی کامل بودن کاتالوگ (Mc) است، زیرا ثبت ناقص زمین‌لرزه‌های کوچک می‌تواند نتایج تحلیل را دچار سوگیری کند. افزون بر این، تحلیل z -value به‌عنوان روشی آماری برای شناسایی تغییرات معنادار در نرخ لرزه‌خیزی و تشخیص نواحی با افزایش فعالیت یا سکون لرزه‌ای استفاده می‌شود و بررسی روند آزادسازی انرژی لرزه‌ای نیز دیدگاه مکملی درباره تکامل زمانی فرایندهای شکست در پوسته فراهم می‌کند. با وجود پژوهش‌های متعدد درباره لرزه‌زمین‌ساخت شمال غرب ایران، اغلب پژوهش‌ها به تحلیل ساختاری گسل‌ها یا برآورد جداگانه شاخص‌های آماری لرزه‌خیزی محدود بوده‌اند. از این‌رو هدف پژوهش حاضر ارائه تحلیلی یکپارچه از رفتار لرزه‌خیزی در محدوده دریاچه ارومیه با استفاده از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC) در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ است. در این پژوهش، بزرگی کامل بودن کاتالوگ (Mc) تعیین، پارامتر b با روش بیشینه درست‌نمایی برآورد، تغییرات فضایی- زمانی نرخ لرزه‌خیزی با تحلیل z -value ارزیابی و روند تغییرات انرژی لرزه‌ای آزادشده بررسی شده است. رویکرد تلفیقی این پژوهش، امکان تفسیر جامع‌تر الگوی تنش و پویایی لرزه‌ای شمال غرب ایران را فراهم می‌کند و می‌تواند در بهبود ارزیابی خطر لرزه‌ای منطقه مؤثر باشد.

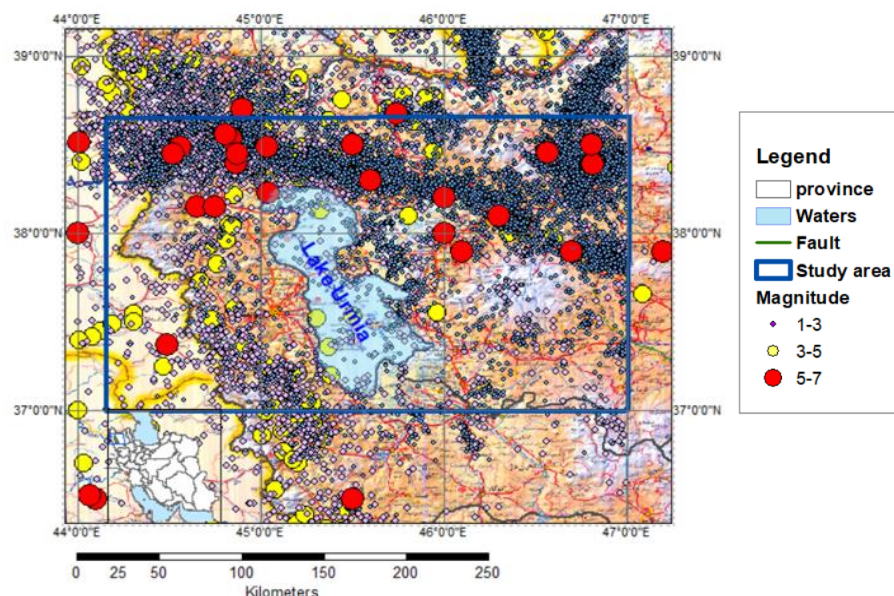


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش



زمین‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساخت منطقه پژوهش

بررسی سوابق زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی منطقه حاکی از وجود پهنه‌های فعال لرزه‌خیز در منطقه ارومیه است (شکل ۲). گسل‌های مهم این منطقه عبارت‌اند از گسل شمال تبریز که در ادامه به گسل شمال میشو و جنوب میشو (شبستر) تقسیم می‌شود. فرایندهای زمین‌ساختی اوایل دونین که با شکستگی نیز همراه بوده در ایجاد این گسل مؤثر بوده است (افتخارنژاد، ۱۳۵۴). فعالیت‌های لرزه‌خیزی گسل تبریز نشان‌دهنده فعال بودن این گسل است. در محل شمال فرودگاه تبریز و باختر خواجه مرجان بر اثر عملکرد گسل تبریز، سنگ‌های میوسن روی رسوبات آبرفتی رانده شده و بخش جنوبی گسل تبریز حدود ۴۰ متر فرو افتاده است (بربریان، ۱۳۵۵). گسل شمال تبریز، نوعی ساختار پیچیده با روند شمال باختری است که شواهد حاصل از تصاویر منطقه نشان از حرکت راستگرد با جابه‌جایی قائم بلوک شمالی آن دارد (بربریان و یتس، ۱۳۷۸). وجود چشمه‌های آبگرم بستان‌آباد در امتداد گسل تبریز و فعالیت‌های لرزه‌خیزی، نشانه فعال بودن این گسل است. برای واقف شدن به اهمیت موضوع زمین‌لرزه‌های شهر تبریز، ذکر این نکته کافی است که زلزله ۱۸ دی ۱۱۵۸ خورشیدی (۱۷۸۰ میلادی)، از مخرب‌ترین و مرگبارترین زمین‌لرزه‌های جهان بوده که با ۷۷ هزار کشته در فهرستی که سازمان زمین‌شناسی آمریکا منتشر کرده است خودنمایی می‌کند. از دیگر گسل‌های مهم منطقه، می‌توان گسل دریاچه ارومیه را نام برد که دنباله گسل شمال تبریز به شمار می‌آید و از ماکو به طرف جنوب ادامه دارد و از غرب دریاچه ارومیه می‌گذرد و به رودخانه زرینه‌رود ختم می‌شود. گسل سلماس مسبب زلزله بزرگ ۱۷ اردیبهشت ۱۳۰۹ سلماس است که طی آن شهر و همه روستاهای سلماس نابود شد. این گسل در ۹۰ کیلومتری شمال ارومیه قرار دارد. پهنه عظیمی از منطقه را دریاچه ارومیه شامل می‌شود که یک ناحیه فرونشسته زمین‌ساختی در پست‌ترین فرونشست آذربایجان است که در اثر عملکرد گسل شمال تبریز در شرق و گسل ارومیه (زرینه‌رود) در غرب ایجاد شده است (شهرابی، ۱۳۷۳).



شکل ۲. نقشه توزیع بزرگی زمین‌لرزه در منطقه ارومیه با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه از مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC)

روش تحقیق

در پژوهش‌های لرزه‌خیزی ابتدا گسل‌های فعال و زمین‌لرزه‌های رخ داده در این گستره معرفی شده است (شکل ۳). در این پژوهش از داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های دستگاهی استفاده شده و تحلیل ساختاری منطقه با استفاده از الگوهای ارائه شده و نرم‌افزارهای Icdl, surfer, Zmap, matlab, ArcGis انجام گرفته است. داده‌های زمین‌لرزه از مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC) گرفته شده است. این داده‌ها بیش از ۲۲ هزار داده زمین‌لرزه با بزرگای بین ۰/۵ تا ۶/۵ در دامنه زمانی ۲۰۰۶/۱/۱ تا ۲۰۲۵/۱/۹

را شامل می‌شود که در میان آنها ۵۲ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۴/۵ و ۲۴ زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۵ مشاهده می‌شود. در این پژوهش b-value، مقدار Z سکون لرزه‌ای، مقدار Mc بزرگی کامل بودن در چارچوب تغییرات مکانی و زمانی فعالیت لرزه‌ای در محدوده مدنظر (اطراف دریاچه ارومیه) به دست آمد. رابطه گوتنبرگ-ریشتر^۱ که اغلب به اختصار G-R law نامیده می‌شود، از بنیادی‌ترین و پرکاربردترین مفاهیم در لرزه‌شناسی است و توصیف آماری فراوانی زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگی آنها را ارائه می‌دهد. رابطه (۱)

$$\log N = a - bM$$

'N' تعداد رخدادهایی با بزرگی M یا بزرگ‌تر از آن و 'a' یک ثابت است. روش‌های متعددی برای تخمین مقدار b وجود دارد. آکی (۱۹۶۵) نخستین بار روش تخمین درست‌نمایی ماکزیمم (MLE) را برای محاسبه مقدار b معرفی کرد.

$$b = \frac{\log_{10}(e)}{(M_{mean} - M_c)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

M_{mean} مقدار متوسط گروه بزرگی با $M_{mean} \geq M_c$ (بزرگی کامل بودن) است. افزون‌بر این، به منظور ارزیابی دقت و ارزیابی عدم قطعیت در تخمین و تغییرات مقدار b (δb)، فرمول آکی (۱۹۸۴) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta b = 2.3b^2 \sqrt{\frac{\sum (M_i - \{M\})^2}{n(n-1)}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

n نشان‌دهنده بزرگی نمونه‌هاست.

در پژوهش‌های لرزه‌شناسی رابطه گوتنبرگ-ریشتر کاربرد بیشتری دارد. این قانون، همبستگی آماری بین فراوانی کلی رخدادهای زمین‌لرزه و بزرگی‌های مربوط به آنها را بیان می‌کند (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۳۳۳). انتخاب روش مناسب برای محاسبه Mc جنبه مهمی از تحلیل مقدار b است. در کاربردهای عملی، Mc نشان‌دهنده قوی‌ترین رخداد با بیشترین فراوانی مشاهده‌شده در توزیع فراوانی-بزرگی غیرتجمعی است. تغییرات در مقادیر b را می‌توان به منزله شاخصی برای تغییرات در وضعیت تنش پوسته و ارزیابی پتانسیل وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر استفاده کرد. با توجه به تعیین مقدار z-value مناطق آرام و فعال منطقه تعیین و مقدار Z با توجه به تعداد زمین‌لرزه به‌طور کمی و آماری تعیین شد. مناطق آرام با محاسبه Z-value تعریف می‌شوند که به صورت آماری فعالیت لرزه‌ای را در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت اندازه‌گیری می‌کند (ویمر و ویس، ۱۳۷۳). برای محاسبه Z-value، ابتدا داده‌های کاتالوگ زمین‌لرزه روی یک منحنی فرکانس تجمعی رسم می‌شوند. سپس یک دامنه زمانی مشخص برای تحلیل تعیین می‌شود. در نهایت، Z-value با استفاده از انحراف معیار و طبق فرمول خاص زیر محاسبه می‌شود:

$$(t) = \frac{(M_1 - M_2)}{\sqrt{\frac{S_1}{n_1} + \frac{S_2}{n_2}}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

M نشان‌دهنده میانگین نرخ و S و n به ترتیب معرف انحراف معیار و اندازه نمونه هستند (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۳۳۳). انرژی آزادشده زمین‌لرزه‌ها از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ به صورت چهار دوره پنج‌ساله مرحله بعدی بررسی را شامل می‌شود که انرژی لرزه‌ای آزادشده برحسب ژول محاسبه می‌شود. این انرژی، نیروی تخریب‌کننده زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های ثبت‌شده، انرژی لرزه‌ای آزادشده از رابطه $\log E = 4.8 + 1.5M_w$ محاسبه و نقشه انرژی آزادشده رسم شد. گشتاور لرزه‌ای معیاری است که برای کمی‌سازی مقدار انرژی آزادشده در طول یک زمین‌لرزه به کار می‌رود. این معیار، ارزیابی دقیق‌تری از اندازه زمین‌لرزه نسبت به مقیاس‌های بزرگای مرسوم ارائه می‌دهد. گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده و سپس برای برآورد انرژی آزادشده از زمین‌لرزه‌ها در محدوده پژوهش استفاده می‌شود. برای تعیین پارامتر گشتاور لرزه‌ای، از ارتباط میان بزرگای گشتاوری (M_w) به صورت زیر استفاده شد (هنکس و کاناموری، ۱۳۵۸).

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad \text{رابطه (۵)}$$

انرژی آزادشده نیز با استفاده از رابطه ۶ و از طریق یک روش تجربی ساده‌شده، از گشتاور لرزه‌ای استخراج می‌شود:

$$\log_{10} E \approx 1.5M_w + 4.8$$

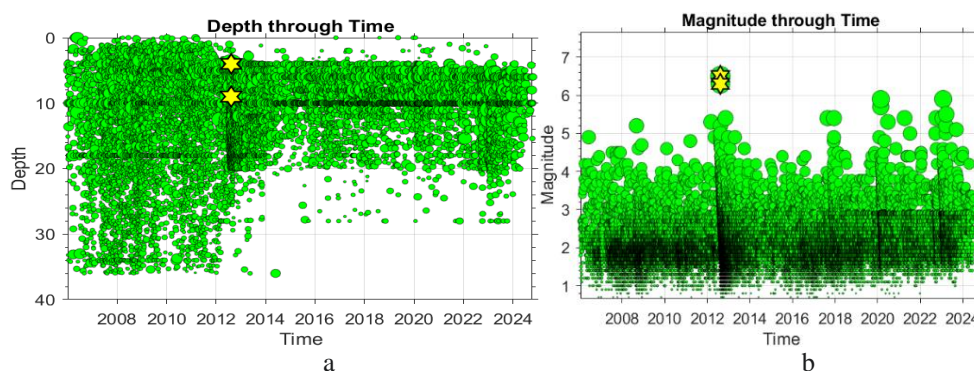
رابطه ۶)

مجموعه داده‌های لرزهای

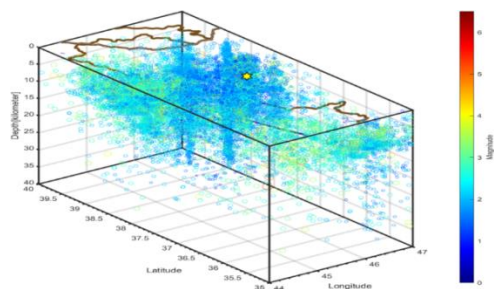
با استفاده از داده‌های زمین‌لرزه به‌دست‌آمده از مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC)، رویدادهایی با بزرگی بیشتر یا مساوی ۰/۵ از تاریخ ۲۰۰۶/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۵/۰۱/۰۱ در این تحقیق منظور شد. مجموعه داده IRSC، ۲۲۴۱۵ رویداد لرزه‌ای است که اطلاعات دقیقی در مورد تاریخ، زمان، عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، عمق و بزرگی برای هر زمین‌لرزه ثبت شده ارائه می‌دهد. کاتالوگ IRSC به‌طور معمول شامل عدم قطعیت‌های موقعیت افقی بین ۵ تا ۱۰ کیلومتر با دقیق‌ترین رویدادهای ثبت شده دارای خطاهای کمتر از ۲ تا ۵ کیلومتر است (حسینی، پاکزاد و ناصریه، ۱۳۹۸).

بحث

بررسی لرزه‌خیزی منطقه ارومیه به‌دلیل زیاد بودن جمعیت ساکنان این منطقه از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، بخش عمده رویدادها دارای بزرگای کم هستند که در بازه ۱ تا ۳ متمرکز شده‌اند. تراکم زیادی از رویدادها در زیر بزرگای ۳ مشاهده می‌شود. آستانه بزرگای ثبت شده احتمالاً به‌دلیل بهبود ابزار دقیق در طول زمان کاهش یافته است (شکل ۳a). پس از یک رویداد بزرگ که با دو ستاره زرد در حدود اواخر سال ۲۰۱۲ مشخص شده است، دو ستاره زرد نشان‌دهنده رویدادهای لرزه‌ای بزرگ هستند که به‌وضوح بر توزیع لرزه‌خیزی منطقه تأثیر گذاشته‌اند. این رویدادها بزرگ‌ترین زلزله‌ها در این دامنه زمانی بوده‌اند. کاهش چشمگیر در تعداد کل رویدادها پس از زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۱۲ مشاهده می‌شود. این کاهش ممکن است به تخلیه تنش‌های منطقه پس از زلزله‌های بزرگ اشاره داشته باشد (شکل ۳b). خوشه‌بندی متراکمی از رویدادها در قسمت مرکزی و شمالی منطقه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌ای زیاد در این بخش‌هاست. این خوشه‌بندی متراکم ممکن است به گسل‌های فعال منطقه از جمله گسل تبریز مربوط باشد. تمرکز رویدادها در عمق کم تا متوسط (کمتر از ۲۰ کیلومتر) نشان‌دهنده فعالیت‌های لرزه‌ای درون‌صفحه‌ای است. موقعیت زمین‌لرزه ۶/۵ ریشتری در سال ۲۰۱۲ در آذربایجان شرقی با یک ستاره زرد مشخص شده است. مشاهده تراکم و توزیع فضایی این زمین‌لرزه‌ها در اطراف ستاره زرد می‌تواند به درک بهتر گستردگی گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی و نحوه آزادسازی تنش در منطقه پس از رویداد اصلی کمک کند (شکل ۴).



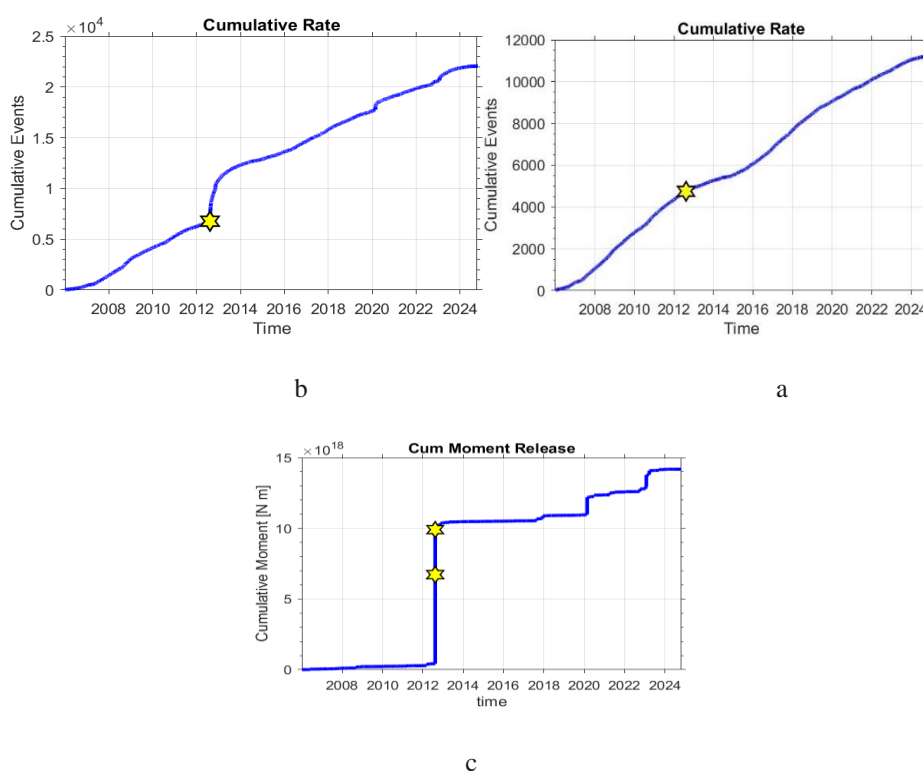
شکل ۳. (a) بزرگا برحسب زمان؛ (b) توزیع عمق کانون زمین‌لرزه



شکل ۴. مدل سه‌بعدی توزیع زلزله‌ها در منطقه پژوهش. محل وقوع زلزله و رزقان با ستاره زرد نشان داده شده است.

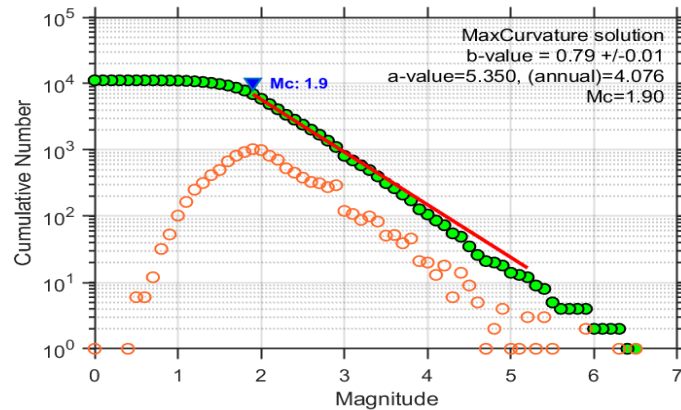
– تجزیه و تحلیل Mc-value و b-value

پارامترهای a و b در رابطه گوتنبرگ- ریشتر از شاخص‌های اساسی برای ارزیابی ویژگی‌های لرزه‌خیزی هر منطقه محسوب می‌شوند؛ به گونه‌ای که a -value بیانگر سطح کلی فعالیت لرزه‌ای و b -value نشان‌دهنده شیب توزیع بزرگی زمین‌لرزه‌هاست. بررسی نرخ تجمعی رویدادهای لرزه‌ای در کاتالوگ منطقه (شکل ۵a) نشان می‌دهد که در حدود سال ۲۰۱۲، افزایش چشمگیری در تعداد زمین‌لرزه‌ها رخ داده که با وقوع زمین‌لرزه ۶/۵ ریشتری ورزقان و پس‌لرزه‌های متعدد آن مرتبط است. پس از این رویداد، با کاهش تدریجی شیب منحنی، نرخ رخداد پس‌لرزه‌ها نیز کاهش یافته و منطقه به شرایط به نسبت پایدار بازگشته است؛ هرچند از حدود سال ۲۰۲۰ افزایش نسبی در نرخ رخداد زمین‌لرزه‌ها مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از فعال شدن مجدد برخی قطعات گسلی یا تداوم فرایندهای تکتونیکی باشد. مقایسه کاتالوگ خام با کاتالوگ همگن‌سازی شده (شکل ۵b) نشان می‌دهد که با حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها، تغییرات شیب منحنی در سال‌های پس از ۲۰۱۳ و نیز حوالی ۲۰۲۰، بیانگر تغییر واقعی در نرخ وقوع زمین‌لرزه‌های مستقل و افزایش فعالیت تکتونیکی منطقه است. افزون بر این، روند آزادسازی تجمعی گشتاور لرزه‌ای (شکل ۵c) الگوی پله‌ای از تخلیه انرژی تکتونیکی را نشان می‌دهد؛ به طوری که جهش اصلی در اوت ۲۰۱۲، همزمان با زمین‌لرزه‌های دوگانه ورزقان- اهر، بخش عمده انرژی لرزه‌ای آزاد شده در دامنه زمانی تحت بررسی را تشکیل می‌دهد. پس از این رویداد، روند آزادسازی انرژی تا حدود سال ۲۰۲۰ حالت به نسبت پایدار داشته است، اما جهش‌های کوچک‌تر در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳ بیانگر فعال شدن مجدد برخی ساختارهای گسلی در منطقه است.



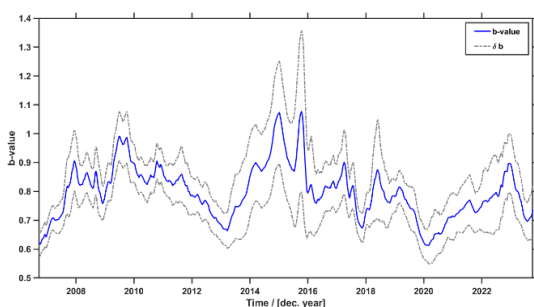
شکل ۵. (a) نرخ تجمعی زلزله به عنوان تابعی از زمان قبل از خوشه‌بندی (b) نرخ تجمعی زلزله به عنوان تابعی از زمان بعد از خوشه‌بندی (c) نرخ تجمعی گشتاور لرزه‌ای در طول زمان (ستاره زرد نشان‌دهنده زمین‌لرزه ۲۰۱۲ ورزقان (با بزرگی ۶/۵ و ۶/۳) است).

با توجه به نتایج به دست آمده، پراکندگی داده‌ها نسبت به خط روند مشهود است. مقدار b -value با توجه به شکل ۶ برای منطقه برابر با 0.79 ± 0.01 با خطای 0.01 به دست آمده که احتمال وقوع زلزله‌های بزرگ نسبت به زلزله‌های کوچک بیشتر است. این موضوع اهمیت ویژه‌ای برای طراحی سازه‌ها و مدیریت بحران دارد، زیرا خطر وقوع زلزله‌های بزرگ‌تر در این منطقه بیشتر است. در این حالت، مقدار b نشان می‌دهد که احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر در این منطقه بیشتر است (شکل ۶).

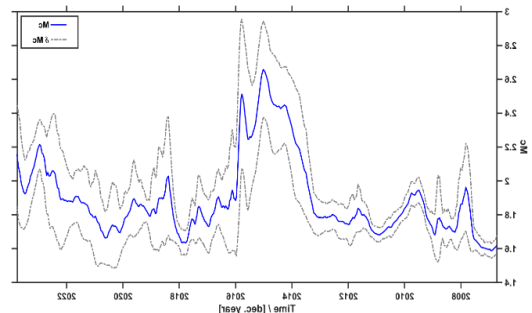


شکل ۶. توزیع تجمعی بزرگی- فراوانی (MFD) در منطقه پژوهش

در بررسی همبستگی میان تغییرات زمانی Mc (شکل ۷) و b -value (شکل ۸)، مشاهده می‌شود که نوسان‌های این دو پارامتر با یکدیگر همخوانی دارد. به‌ویژه در دامنه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵، افزایش ناگهانی Mc که ناشی از فعالیت پس‌لرزه‌های شدید زلزله و رزقان و اشباع شبکه بود، سبب تغییرات متناظر در مقدار b -value شده است. این همخوانی تأیید می‌کند که برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی به شدت تحت تأثیر کامل بودن کاتالوگ قرار دارد. با این حال، در سال‌های اخیر با کاهش و تثبیت مقدار Mc در سطوح پایین، مقدار b -value نیز پایداری بیشتری نشان می‌دهد که این موضوع حاکی از قابلیت اعتماد زیاد نتایج در بازه‌هایی است که شبکه از توان تفکیک مناسبی برخوردار است.



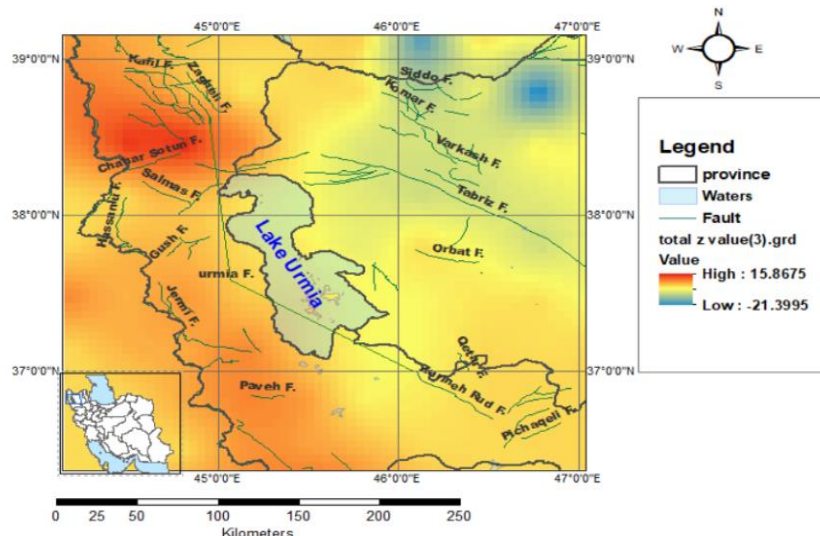
شکل ۸. تغییرات زمانی b -value



شکل ۷. تغییرات زمانی Mc

– توزیع لرزه‌ای بر حسب Z -value

در پژوهش‌های لرزه‌شناسی پیشرفته، Z -value را می‌توان شاخصی آماری برای بررسی تغییرات نرخ لرزه‌خیزی و شناسایی مناطق مستعد وقوع زلزله‌های بزرگ نیز دانست. در منطقه مدنظر احتمالاً قبل از یک زلزله بزرگ، تنش افزایش یافته و سبب قفل شدن گسل‌ها و کاهش لرزه‌های کوچک می‌شود. این مناطق به‌طور بالقوه مستعد تجمع تنش و در نتیجه وقوع زلزله‌های بزرگ‌تر در آینده هستند و مقادیر منفی و کم (آبی/سبز) نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار در نرخ لرزه‌خیزی هستند که ممکن است به دلایل مختلفی از جمله فعالیت پیش‌لرزه‌ای (اگر در پی یک زلزله بزرگ‌تر باشد) یا پس‌لرزه‌ای (اگر در پی یک زلزله اصلی باشد) رخ دهد. گسل‌ها نقاط ضعف پوسته زمین هستند که تنش‌ها در آنها تخلیه می‌شوند و محل اصلی وقوع زمین‌لرزه‌ها هستند. همپوشانی مناطق با Z -value کم و تنش لرزه‌ای زیاد با گسل‌های اصلی (مانند گسل تبریز، گسل اوربات و گسل صوفیان) مشاهده می‌شود. دریاچه ارومیه در مرکز این منطقه قرار دارد. محیط اطراف دریاچه به‌ویژه غرب و جنوب آن شامل مناطقی با Z -value زیاد و کاهش نرخ لرزه‌خیزی یا سکون لرزه‌ای است که ممکن است پیامدهای مهمی برای خطر لرزه‌ای در این منطقه پرجمعیت داشته باشد (شکل ۹). تغییرات سطح آب دریاچه ارومیه و بارگذاری و تخلیه آن می‌تواند بر تنش‌های پوسته زمین تأثیر بگذارد، هرچند تحلیل دقیق این موضوع به داده‌های بیشتری نیاز دارد.



شکل ۹. نقشه z-value منطقه پژوهش

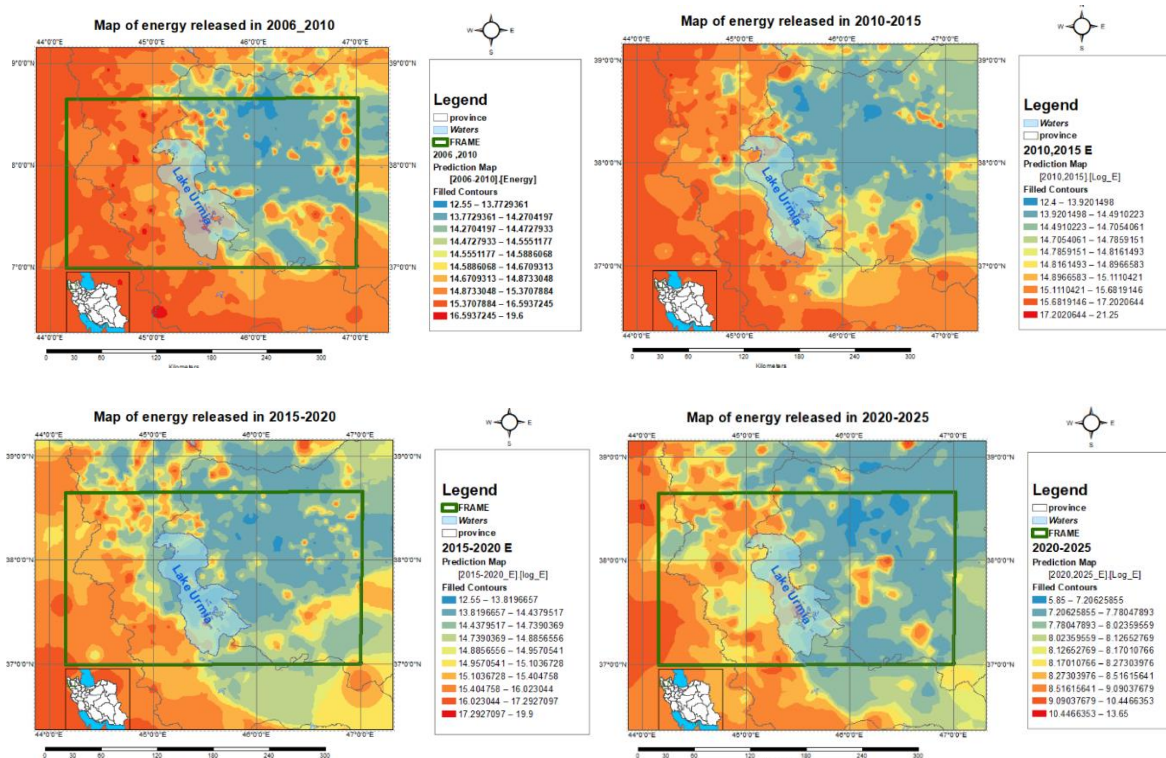
– توزیع لرزه‌ای بر حسب انرژی آزادشده

هر زمین‌لرزه با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مقدار خاصی انرژی آزاد می‌کند. برای بررسی انرژی آزادشده از زمین‌لرزه‌های محدوده تحت بررسی، نقشه انرژی آزادشده نوزده دوره یکساله و چهار دوره پنج‌ساله از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵ رسم شد (شکل ۱۰). به منظور برآورد انرژی لرزه‌ای آزادشده، از روابط تجربی گوتنبرگ- ریشتر (۱۹۵۶) استفاده شد. برای یکنواخت‌سازی داده‌ها در نرم‌افزار Z-MAP، تبدیل مقیاس‌های مختلف بزرگی (Mn) به بزرگی گشتاوری (Mw) بر اساس پژوهش‌های پیشین در فلات ایران انجام گرفت تا دقت محاسبات انرژی تضمین شود. تحلیل نقشه‌های توزیع انرژی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی منطقه به شدت تحت کنترل گسل‌های فعال، به ویژه گسل تبریز قرار دارد. بیشینه تمرکز انرژی در همه دوره‌ها در مناطق جنوب و جنوب غرب دریاچه مشاهده می‌شود که با امتداد گسل‌های اصلی همخوانی دارد. بررسی بازه‌های زمانی (۲۰۰۶ تا ۲۰۲۵) حاکی از روند افزایشی در مجموع انرژی آزادشده است؛ به گونه‌ای که در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۰، پهنه‌های پرانرژی (قرمز) توسعه یافته و به سمت شرق گسترش یافته‌اند که این امر احتمالاً ناشی از انتقال تنش^۱ میان گسل‌هاست. تضاد میان فعالیت لرزه‌ای حاشیه دریاچه و سکون نسبی مرکز آن، افزون بر کنترل‌های ساختاری، می‌تواند ناشی از اثرهای محیطی (مانند ویژگی‌های رسوبی حوضه) یا تغییر در میدان تنش بر اثر کاهش تراز سطح آب دریاچه باشد. روند مشاهده شده طی دو دهه اخیر و تجمع متناوب تنش در جنوب و شرق، مؤید تداوم پویایی تکتونیکی منطقه است؛ از این رو این مناطق همچنان کانون‌های اصلی خطر لرزه‌ای محسوب می‌شوند و ضرورت ارزیابی‌های دقیق‌تر لرزه‌زمین‌ساختی را گوشزد می‌کنند.

– مقایسه نتایج با پژوهش‌های پیشین

مقدار برآوردشده در این پژوهش ($b=0.79$) کمتر از مقدار میانگین جهانی یعنی ۱ (Richter, 1949 & Gutenberg) است. با این حال، این مقدار کم با نتایج میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) و توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) که مقادیر b را در پهنه‌های پرتنش ایران بین ۷ تا ۸ برآورد کرده بودند، سازگاری کامل دارد و مؤید تمرکز تنش تفاضلی زیاد در شمال غرب ایران است. در مقابل، اختلاف کمی با مقادیر نزدیک به ۱ در پژوهش کریمی پریدری و همکاران (۲۰۱۳) دیده می‌شود؛ این ناهمخوانی ناشی از تفاوت در طول دوره کاتالوگ، روش محاسباتی و تعیین بزرگی کامل بودن (Mc) ارزیابی می‌شود. شناسایی زون‌های سکون لرزه‌ای موقت در مجاورت گسل‌های فعال منطقه (مانند گسل شمال تبریز و سلماس) با الگوهای کلاسیک لرزه‌شناسی تطابق دارد. این نتایج با یافته‌های ویمر و ویس (۱۹۹۴) در خصوص تغییرات نرخ لرزه‌خیزی پیش از رویدادهای بزرگ همخوانی دارد؛

هرچند مطابق پژوهش‌های علمی، این سکون لرزه‌ای پیش‌نشانگر قطعی نیست، بلکه بازتابی از تغییرات نرخ تنش محلی است. الگوی چرخه‌ای و پله‌ای آزاد شدن انرژی در این پژوهش، مدل انباشت و آزادسازی تنش روی گسل‌های جنب (به‌ویژه زون سلماس و تبریز) را تأیید می‌کند. این روند با مدل‌های تکتونو-پلوتونیک ارائه‌شده توسط بربریان (۱۹۸۱) و تحلیل‌های ساختاری بربریان و یتس (۱۹۹۹) پیرامون گسلش فعال در شمال غرب ایران هم‌راستاست. همچنین تأثیر احتمالی کاهش تراز آب دریاچه ارومیه بر دگرشکلی‌های پوسته و تغییرات میدان تنش، فرضیه‌ای است که لزوم پایش مداوم منطقه را دوچندان می‌کند.



شکل ۱۰. نقشه انرژی آزادشده ۲۰۱۰-۲۰۱۵، ۲۰۱۵-۲۰۲۰، ۲۰۲۰-۲۰۲۵ و ۲۰۲۰-۲۰۲۵

نتیجه‌گیری

مقدار M_c برای کل منطقه حدود ۱/۹ برآورد شد. نوسان‌های زمانی این پارامتر نشان داد که در سال ۲۰۱۲ (همزمان با زلزله ورزقان)، این مقدار به دلیل اشباع شبکه به‌طور موقت افزایش یافته، اما در سال‌های اخیر به ثبات رسیده است که نشان‌دهنده دقت زیاد کاتالوگ در تحلیل‌های آماری فعلی است. میانگین مقدار b در کل منطقه حدود ۰/۷۹ محاسبه شد. این مقدار به‌طور چشمگیری کمتر از مقدار نرمال (۱/۰) است، از این‌رو نشان‌دهنده سطح بالای استرس تکتونیک و حاکمیت زمین‌ساخت فعال در پوسته منطقه است. تحلیل فضایی-زمانی شاخص Z نشان داد که ناهنجاری‌های مثبت (سکون لرزه‌ای) به‌طور مشخص بر بخش‌های گسل تبریز و گسل تسوج منطبق است. این سکون لرزه‌ای در کنار کاهش b -value در این نواحی، نشان‌دهنده پتانسیل زیاد انباشت انرژی است. نمودار مجموع انرژی آزادشده نشان‌دهنده ورود منطقه به گام جدیدی از فعالیت یا آمادگی برای رویدادهای آتی است. مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی انرژی لرزه‌ای در بازه‌های پنج‌ساله نشان می‌دهد که پس از فعالیت شدید لرزه‌ای در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۰ در شمال و شمال شرق دریاچه ارومیه (مرتبط با رویدادهای ورزقان)، این منطقه در بازه اخیر (۲۰۲۵-۲۰۲۰) وارد یک دوره سکون لرزه‌ای معنادار شده است. کاهش مقدار $\text{Log}E$ از مقادیر بیشینه ۲۱/۲ در دهه گذشته به حدود ۱۳/۶ در سال‌های اخیر در پهنه‌های شمالی، در کنار نتایج حاصل از شاخص Z ، فرضیه تجمع استرس در گسل‌های شمال

دریاچه را تقویت می‌کند. در مقابل، بخش‌های جنوبی و جنوب غربی فعالیت‌های پراکنده و خردلرزه‌ای بیشتری را نشان می‌دهند که مانع شکل‌گیری سکون لرزه‌ای مطلق در آن نواحی شده است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، انجام دادن تحقیق و نوشتن نسخه اولیه
نویسنده‌های دوم، سوم و چهارم و پنجم: راهنمایی، ویرایش، بازبینی و کنترل نتایج

حامی مالی

مقاله حاضر از هیچ حمایت مالی برخوردار نبوده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از یکایک مشارکت‌کنندگان در این پژوهش قدردانی می‌کنند.

منابع

- Aghanabati, S. A. (2004). *Geology of Iran. Geological Survey of Iran*, 587 p. (Persian).
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimates of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 43, 237–239.
- Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8), 983–992.
- Berberian, F., & Berberian, M. (1981). Tectono-plutonic episodes in Iran. In H. K. Gupta & F. M. Delany (Eds.), *Zagros–Hindu Kush–Himalaya Geodynamic Evolution* (pp. 5–32). American Geophysical Union.
- Berberian, M. (1974). Structural history of the Southern Lut Zone (Northern Highlands of Jaz Murian Depression, Baluchestan): A preliminary field note. Internal Report No. 21, *Geological Survey of Iran*, 21 p.
- Berberian, M., & Yeats, R. S. (1999). Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 120–139.
- Copley, A., & Jackson, J. (2006). Active tectonics of the Turkish–Iranian plateau. *Tectonics*, 25(6).
- Eftekhari-Nezhad, J. (1975). *Brief history and structural development of Azerbaijan*. Geological Survey of Iran (Internal Report), 8 p.
- Eftekhari-Nezhad, J., Aghanabati, A., Hamzehpour, B., & Baroyant, V. (1976). *Geological map of Kashmar*, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2022). *ArcGIS Pro* (Version 3.0). Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Gutenberg, B., Richter, C. F., & Benioff, H. (1949). Earthquake study in southern California, 1948. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 30(4), 595–598.
- Hanks, T. C., and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2348–2350.
- Hosseini, H., Pakzad, M., & Naserieh, S. (2019). Iranian regional centroid moment tensor catalog: Solutions for 2012–2017. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 286, 29–41.
- Karimiparidari, S., Zaré, M., Memarian, H., & Kijko, A. (2013). Iranian earthquakes: A uniform catalog with moment magnitudes. *Journal of Seismology*, 17(3), 897–911.
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Prentice Hall.
- Kelt, K., & Shahrabi, M. (1986). Holocene sedimentology of hypersaline Lake Urmia, northwestern Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 54(1–4), 105–130.
- Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.
- MathWorks (2022). MATLAB version 9.13.0 (R2022b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- Mirzaei, N., Mengtan, G., & Yuntai, C. (1998). Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 7, 465–495.
- Rahimi, H., & Rastgoo, M. (2022). Application of NDSHA at regional and local scale in Iran. In A. A. Gholizadeh & M. Zare (Eds.), *Earthquakes and Sustainable Infrastructure* (pp. 583–600). Elsevier.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., & Wyss, M. (2004). Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of b values. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B12), B12307
- Seyed-Emami, K., Schairer, G., & Bolourchi, M. H. (1985). Ammoniten aus der unteren Dalichy-Formation (oberes Bajocium bis unteres Bathonium) der Umgebung von Abe-Garm (Avaj, NW-Zentraliran). *Zitteliana*, 12, 57–85.
- Shahrabi, M. (1981). *Holocene lacustrine facies and environment of hypersaline Lake Urmia*, NW Iran. Unpublished diploma thesis, ETH Zurich, Switzerland, 75 p.
- Shahrabi, M. (1994). Description of the Urumieh geological map (scale 1:250,000). Geological Survey of Iran, Report No. B3, 90 p.
- Sharabi, M. (1990). *Geological map of Gorgan*, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran.
- Tavakoli, B., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Seismic hazard assessment of Iran. *Annals of Geophysics*, 42(6).
- Tavakoli, F., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Seismic hazard assessment of Iran. *Annali di Geofisica*, 42, 1013–1022.
- Verstappen, H. T. (1983). *Applied Geomorphology: Geomorphological Surveys for Environmental Development*. Elsevier.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2).
- Wiemer, S., & Wyss, M. (1994). Seismic quiescence before the Landers (M7.5) and Big Bear (M6.5) 1992 earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 900–916.
- Wiemer, S., & 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), 15115–15128.

- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382.
- Zare, M., & Shahpasand Zade, M. (1995). *Elementary investigation of seismicity, seismotectonics and seismic risk of East Azerbaijan*. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tehran.