

ماهیت فرکتالی الگوی لرزه‌خیزی پیش از زمین‌لرزه‌های دوگانه ۱۴۰۱ هرمزگان، جنوب ایران

مریم آق آتابای^{۱*} و فاطمه منچر^۲

^۱ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸)

چکیده

دو زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری (Mw) بیش از ۶ در تاریخ ۱۱ تیر ۱۴۰۱ هجری شمسی در غرب بندر خمیر استان هرمزگان در جنوب ایران رخ دادند. کانون سطحی این زمین‌لرزه‌ها بر روی یک زون متراکم لرزه‌خیزی، با روند شمال‌شرق-جنوب غرب انتهایی جنوب شرقی کمربند چین‌خورده رانده زاگرس در جنوب ایران قرار دارند. در این پژوهش، تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی شامل b-value و ابعاد فرکتالی مراکز سطحی و زمان رویداد زمین‌لرزه‌ها پیش از این زمین‌لرزه‌ها بررسی شد. داده‌ها در محدوده دایره‌ای شکل به مرکز لرزه‌نگاری ایران برگرفته شد. بر اساس نتایج این پژوهش، کیلومتر برای یک دوره زمانی ۳/۵ ساله (از ابتدای ۲۰۱۹ تا زمان رویداد زمین‌لرزه‌ها) از مرکز لرزه‌نگاری ایران برگرفته شد. بر اساس نتایج این پژوهش، تا قبل از سال ۲۰۲۱ (۱/۵ سال پیش از رویداد زمین‌لرزه‌های هدف) پارامترهای فرکتالی تغییراتی متناسب با رخداد خوشه‌های لرزه‌ای متعدد این دوره زمانی نشان می‌دهند. بین سالهای ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ روند تغییرات دو پارامتر b-value و Dt پس از یک افزایش قابل توجه و De نسبتاً پایدار بوده است. سپس هر سه پارامتر لرزه‌خیزی در یک دوره زمانی چند ماهه پیش از زمین‌لرزه‌های اصلی الگوی مشابه (افزایش مقدار) نشان داده‌اند. بررسی نمودارهای نرخ ماهانه لرزه‌خیزی و بزرگا-زمان نشان داد که نرخ لرزه‌خیزی از اوایل سال ۲۰۲۱ تا قبل از زمان رویداد زمین‌لرزه‌های اصلی غرب بندر خمیر بسیار کم و زمین‌لرزه‌ها بصورت پراکنده در زمان رخ داده‌اند. اما نمودار مکان-زمان نشان می‌دهد که چند ماه قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های اصلی یک دوره آرامش لرزه‌ای در اطراف زمین‌لرزه اصلی حاکم بوده و هم‌زمان با آن در شمال منطقه لرزه‌خیزی تداوم داشته است. نظر می‌رسد تغییرات معنادار پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی در زمان حدود چند ماه پیش از رویداد زمین‌لرزه اصلی به دلیل آرامش لرزه‌ای حاکم بر منطقه است که می‌توان آن‌ها را به عنوان پیش‌نشانگر میان‌مدت زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر استان هرمزگان معرفی کرد.

کلید واژه: پیش‌نشانگر، الگوی لرزه‌خیزی، خوشه‌بندی، زون گذر، زاگرس

مقدمه

فرایندهای زمین فیزیکی از جمله لرزه خیزی، دارای الگوی پیچیده بوده (Ashkenazy et al., 2001) که با وجود این پیچیدگی، دارای نظم خاصی هستند (Telesca et al., 2006). در واقع شواهد نشان می‌دهند که رخداد زمین لرزه‌ها تصادفی نبوده و پدیده خوشه‌بندی (مکانی و زمانی) از خصوصیات بارز آنها در مناطق فعال زمین ساختی است که با استفاده از روش‌های فرکتالی قابل درک است. (Bak and Tang, 1989; Kagan and Jackson, 1991; Telesca et al., 2006). واژه فرکتال از ریشه یونانی فرکتوس به معنای «شکسته شده» و معادل فارسی آن «برخال» است. در هندسه فرکتالی هر جز شبیه کل است و پدیده فرکتالی از تکرار جزء در مقیاس‌های مختلف ایجاد می‌شود؛ به عبارتی این پدیده‌ها مقیاس‌ناوردا (Scale invariance) هستند (Turcotte, 1992). یکی دیگر از ویژگی‌های پدیده‌های فرکتالی دارا بودن بعد ناصحیح یا کسری با نام بعد فرکتالی است. ابعاد فرکتالی معیاری ریاضیاتی است که به تعیین درجه پیچیدگی پدیده‌ها می‌پردازد و از قانون توانی نظیر معادله $N = \frac{C}{r^D}$ پیروی می‌کند که در آن N تعداد پدیده‌ها با اندازه بزرگتر از مقیاس خطی r ، C مقدار ثابت و D بعد فرکتالی است (Mandelbrot, 1982). به عنوان مثال بعد فرکتالی $1/2$ به معنای پدیده‌ای بینابین خط و صفحه است که به حالت خطی نزدیک ولی پیچیده‌تر از آن می‌باشد. فرکتالی بودن فرایند لرزه خیزی به این معناست که رخداد زمین لرزه‌ها در مکان، زمان و بزرگی تابع مقیاس نیست و نظم موجود در الگوی رخداد آنها را می‌توان با روش‌های فرکتالی بررسی کرد (Smalley et al., 1987; Turcotte, 1992; Mittag, 2003; Telesca et al., 2006; Bayrak et al., 2017). به عنوان مثال با استفاده از این روش‌ها و با محاسبه ابعاد فرکتالی توزیع زمین لرزه‌ها در مکان و زمان می‌توان در تعیین روند پهنه‌های لرزه‌خیز و امتداد گسل‌های پنهان فعال

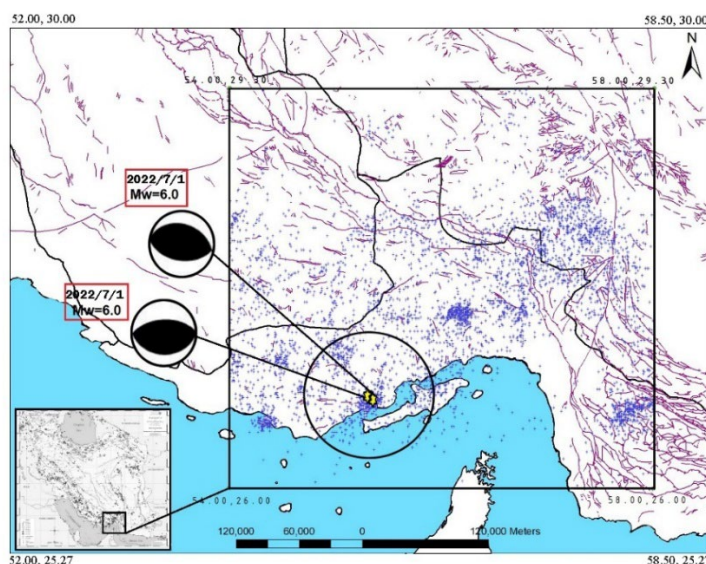
شده و همچنین پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای احتمالی بهره برد. یکی از اهداف مهم مطالعات لرزه‌خیزی یافتن الگوی رفتاری پیش از زمین لرزه‌ها یا به عبارتی پیش‌نشانگرها است. یکی از انواع پیش‌نشانگرهای زمین لرزه‌ها، پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای است که با الگوهای لرزه‌خیزی خاص در دوره‌هایی قبل از رویداد زمین لرزه اصلی مشخص می‌شوند. پیش‌لرزه‌ها، الگوی دونات و آرامش لرزه‌ای از جمله الگوهای لرزه‌خیزی هستند که می‌توانند در دوره زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلند مدت قبل از رویداد زمین لرزه‌ها به عنوان پیش‌نشانگر بکار برده شوند (Mogi, 1985; Scholz, 2002). یکی از راه‌های یافتن الگوی لرزه‌خیزی در زمان‌هایی پیش از زمین لرزه‌های بزرگ، بررسی تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی می‌باشد. براساس مشاهدات محققین، پارامترهای لرزه‌خیزی نظیر b -value در رابطه فراوانی-بزرگی (Gutenberg and Richter, 1954)، بعد فرکتالی مراکز سطحی زمین لرزه‌ها (De) و بعد فرکتالی زمان رویداد زمین لرزه‌ها (Dt) قبل از وقوع زمین لرزه‌های بزرگ مناطق لرزه‌خیز دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود (Bayrak et al., 2017).

در این پژوهش، الگوی لرزه‌خیزی پیش از زمین لرزه‌های ۱۴۰۱ (سال ۲۰۲۲ میلادی) غرب بندر خمیر در استان هرمزگان با استفاده از روش‌های فرکتالی بررسی شده است. مطالعه این زمین لرزه‌ها از این نظر حائز اهمیت است که دو زمین لرزه با بزرگی گشتاوری (Mw) بیش از ۶ با فاصله زمانی بسیار کوتاه در این استان اتفاق افتاد (Yang et al., 2023) در همین فاصله کوتاه بین زمین لرزه‌های اصلی اول و دوم پس لرزه‌ای با بزرگی ۵/۷ نیز رخ داده است. در این مقاله، به منظور یافتن الگوی پیش‌نشانگری در الگوی لرزه‌خیزی، تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی شامل b -value و ابعاد فرکتالی مراکز سطحی و زمان رویداد زمین لرزه‌ها در یک دوره سه ساله پیش از این زمین لرزه‌ها مطالعه شد.

۲ لرزه زمین ساخت منطقه مورد مطالعه

کانون سطحی زمین لرزه های ۱۴۰۱ غرب بندر خمیر استان هرمزگان در منطقه ای در انتهای جنوب شرقی کمربند چین خورده رانده زاگرس قرار دارد، جایی که یک زون تراکم لرزه خیز با روند شمال شرق در آن مشاهده می شود. این زون که از انتهای جنوب غربی جزیره قشم شروع می شود، در جهت شمال شرقی تا آن سوی گسل اصلی معکوس زاگرس به صورت قابل ملاحظه ای امتداد پیدا کرده است (شکل ۱). عمق زمین لرزه ها در این زون به تدریج به سمت شمال شرق افزایش یافته و تا ۴۵-۳۰ کیلومتری پوسه نیز می رسد (Yaminifard et al., 2007). پس از گذر از این زون لرزه خیز بر روی کمربند برخورد قاره ای زاگرس با روند عمومی شمال شرق جنوب غرب، در سمت شرق زون فرورانشی مکران با روند شرقی-غربی قرار دارد. به نظر می رسد، پیش از برخورد صفحات عربستان و ایران، در منطقه زاگرس و مکران کنونی و یک زون پیوسته فرورانش وجود داشته است که در غرب برخورد رخ داده ولی در شرق فرورانش همچنان تداوم یافته است (Regard et al., 2010). زون گذر بین این دو در جبهه شبه جزیره

عمان قرار دارد و به نظر می رسد در زمان برخورد قاره ای این منطقه به عنوان یک ناهمگنی عمل کرده و با برخورد قاره ای زاگرس تداخل و باعث ایجاد انحنای آن شده باشد (Aubourg et al., 2008; Regard et al., 2010). این زون که با تغییر در شکل و روندهای ساختاری و کاهش فاحش فعالیت لرزه ای و گنبد های نمکی از غرب به شرق همراه است، با عناوینی نظیر سین تاکس (Syntaxis) بندر عباس و خطواره عمان نیز خوانده می شود (Molinario et al., 2004). لازم به ذکر است که به عقیده محققین (Kadinsky-Cade and Barazangi, 1982) خطواره عمان از نظر لرزه خیزی غیر فعال بوده ولی مرز بین یک زون فعال با تراکم لرزه ای بالا در غرب یعنی زاگرس و زون با تراکم لرزه ای پایین در شرق یعنی مکران را از یکدیگر جدا کرده است. به عقیده یمینی فرد و همکاران (۲۰۰۷) زون گذر زاگرس و مکران مرتبط با یک گسل شاخص نبوده، بلکه یک زون گذر تدریجی است (Yamini-Fard et al., 2007; Regard et al., 2010). از گسل های استان هرمزگان و مناطق هم جوار آن می توان به گسل پیشانی کوهستان زاگرس (Mountain Front Fault, MFF)، گسل زاگرس



شکل ۱. نقشه لرزه خیزی منطقه که بر روی کانون سطحی و سازوکار کانونی زمین لرزه های ۱۴۰۱ غرب بندر خمیر استان هرمزگان نشان داده شده است. ستاره های زرد رنگ محل مراکز سطحی زمین لرزه های دوگانه ۱۴۰۱ هرمزگان و دایره محدوده داده های مطالعه شده در این پژوهش را نشان می دهد.

نیمه‌لگاریتمی فراوانی-بزرگی محاسبه می‌شود، بیانگر نسبت زمین‌لرزه‌های بزرگ به کوچک است. طبق این رابطه هنگامی که شیب نمودار لگاریتمی کم است، نسبت زمین‌لرزه‌ها با بزرگی بالاتر بیشتر خواهد بود و خطر لرزه‌خیزی هم به همان نسبت بالا خواهد رفت (Agh-Atabai & Mirabdini, 2014). مقدار b در مناطق مختلف بین ۰/۵ تا ۱/۵ تغییر می‌کند. در این پژوهش برای محاسبه b -value از روش برآورد درست‌نمایی حداکثر (Maximum likelihood method) (Aki, 1965):

$$b = \frac{\log_{10} \bar{M}}{\bar{M} - M_{min}} \quad (2)$$

که \bar{M} بزرگای میانگین و M_{min} یا M_c حداقل بزرگی یا همان حداقل بزرگی کمال (Minimum magnitude of completeness) است که داده‌های کوچک‌تر از آن به‌طور کامل ثبت نشده است یا به عبارتی داده‌های بزرگ‌تر و مساوی آن بطور کامل گزارش شده‌اند (Wiemer and Wyss, 2000). روش انتخاب بزرگی کمال روش انحنای حداکثر نام دارد که در آن بیشترین میان انحنای نمودار از روی نمودار غیرتجمعی انتخاب می‌شود (Wiemer, 2001).

در این پژوهش، برای محاسبه بعد فرکتالی مکانی یا مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها و زمان رویداد آنها از روش انتگرال همبستگی (Correlation integral method) استفاده شد (Grassberger and Procaccia, 1983). بعد فرکتالی محاسبه شده با استفاده از این روش، بعد همبستگی است که بیان‌گر میزان فضای اشغال شده توسط نقاط است (Grassberger and Procaccia, 1983). این روش به دلیل حساسیت به کوچک‌ترین تغییرات از اطمینان بالایی برخوردار است و دارای کاربرد فراوان است. بعد فرکتالی همبستگی (D_2) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\log C(r)}{\log r} \right] \quad (3)$$

مرتفع (High Zagros Fault, HZF)، گسل پیش ژرفای زاگرس (Zagros Foredeep Fault, ZFF)، سامانه گسلی مینا-زندان (Minab-Zendan-Palmi Fault zone) اشاره کرد. بررسی تاریخچه لرزه‌خیزی نشان می‌دهد که این منطقه با رخداد تعداد زیادی زمین‌لرزه تاریخی و دستگامی یکی از لرزه‌خیزترین مناطق ایران است؛ طوری که در برخی از اوقات تعداد قابل توجهی زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۶ در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه در آن رخ داده است. به عنوان مثال، دو زمین‌لرزه با بزرگی‌های ۶/۱ و ۶/۴ با فاصله زمانی در حد دقیقه در شمال شرقی فین در تاریخ ۲۳ آبان ۱۴۰۰ (۱۴ نوامبر ۲۰۲۱) و زمین‌لرزه‌های ۱۴۰۱ تیر ماه غرب بندر خمیر در این منطقه رخ داده‌اند. کانون سطحی زمین‌لرزه‌های غرب بندر خمیر در نزدیکی گسل پیش‌بوم زاگرس (ZFF) قرار دارند (Eslami and Taghaboni, 2022).

۳ روش پژوهش

در این مقاله، برای مطالعه الگوی لرزه‌خیزی جزیره قشم و حوالی آن از پارامترهای فرکتالی b -value در رابطه فراوانی-بزرگی گوتنبرگ-ریشتر (Gutenberg and Richter, 1954) و بعد همبستگی (Correlation dimension) مراکز سطحی و زمان رویداد زمین‌لرزه‌ها استفاده شد (Grassberger and Procaccia, 1983). محاسبه b -value در رابطه فراوانی-بزرگی گوتنبرگ-ریشتر یکی از کاربردی‌ترین و ساده‌ترین ابزارها برای برآورد خطر لرزه‌ای است که از رابطه زیر برآورد می‌شود (Gutenberg and Richter, 1954):

$$\log_{10} N = a - b(M) \quad (1)$$

که در آن M بزرگی، N تعداد زمین‌لرزه‌ها در یک محدوده با بزرگی مساوی و بیش از M و a , b مقادیر ثابت معروف به پارامترهای لرزه‌خیزی هستند. مقدار a معرف سطح فعالیت لرزه‌خیزی و b یا b -value که از شیب نمودار

۴ تجزیه و تحلیل داده ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از مرکز لرزه‌نگاری ایران (IRSC; Iranian Seismological Center, <http://irsc.ut.ac.ir>) در محدوده دایره‌ای شکل به مرکزیت کانون سطحی زمین لرزه اول ۱۴۰۱ غرب بندر خمیر در استان هرمزگان، و شعاع ۶۰ برای یک دوره زمانی ۳/۵ ساله (از ابتدای ۲۰۱۹ تا زمان رویداد زمین لرزه‌ها) برگرفته شد. ابتدا برای تعیین بزرگای کمال M_c داده‌های برگرفته شده، نمودار فراوانی - بزرگا ترسیم شد (شکل ۲- الف). بر اساس این نمودار مقدار بزرگای کمال ۲/۹ و b -value برای کل داده‌ها ۰/۶۱ محاسبه شد. لذا برای محاسبات بعدی زمین لرزه‌های کوچک‌تر از ۲/۹ حذف گردید. برای بررسی الگوی لرزه‌خیزی پیش از زمین لرزه‌های ۲۰۲۲ هرمزگان تغییرات زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی مطالعه شد. در این مقاله، برای بررسی تغییرات زمانی الگوی لرزه‌خیزی از روش پنجره با طول ثابت یک سال و گام‌های سه ماهه بهره برده شد. برای انتخاب طول پنجره زمانی سعی شد بین تعداد داده کافی در هر پنجره (هر چه طول پنجره بیشتر تعداد داده بیشتر) و بررسی جزئیات تغییرات پارامتر (هر چه پنجره کوتاهتر جزئیات بیشتر) تعادل برقرار شود. از طرفی با همپوشانی ۹ ماهه پنجره‌های انتخابی (گام‌های سه ماهه) تغییرات الگوی لرزه‌خیزی در بازه سه ماهه مسیر شد. برای هر کدام از پنجره‌های مذکور هر سه پارامتر b -value، D_t و D_e محاسبه شد. در شکل ۲ ب نمودار فراوانی-بزرگا به عنوان نمونه در یکی از پنجره‌های زمانی (۲۰۲۰/۵ تا ۲۰۲۱/۵) نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز نمونه‌ای از نمودارهای انتگرال همبستگی ترسیم شده برای محاسبه ابعاد فرکتالی مراکز سطحی و زمان رویداد زمین لرزه‌ها در یک پنجره (اواسط ۲۰۲۰ تا اواسط ۲۰۲۱) نشان داده شده است. در نهایت پس از محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی برای تمام پنجره‌های زمانی پیش از زمین لرزه‌های ۲۰۲۲ هرمزگان، نمودارهای تغییرات زمانی

که r شعاع مقیاس بندی و $C(r)$ تابع انتگرال همبستگی است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{H(r - 1\|x_i - x_j\|)}{H(r)} \quad (4)$$

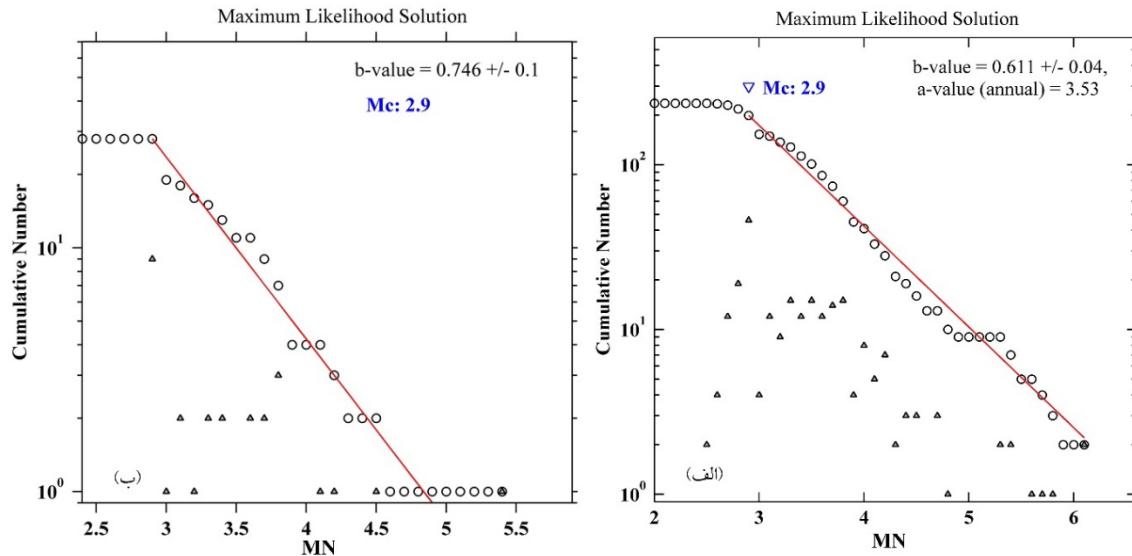
که در آن N تعداد کل داده‌ها، $\|x_i - x_j\|$ فاصله بین دو نقطه (مرکز سطحی یا زمان دو زمین لرزه x_i و x_j) و H تابع شمارنده نقاطی که فاصله مکانی یا زمانی آنها از نقطه مورد نظر کمتر از r است، طوری که اگر $\|x_i - x_j\| < r$ باشد آنگاه $H=1$ و نقطه شمارش شده و در حالتی که $\|x_i - x_j\| \geq r$ باشد، $H=0$ و نقطه شمرده نخواهد شد (Dimiri, 2000). تابع انتگرال همبستگی در هر شعاع r میانگین تقریبی تعداد نقاط اطراف هر نقطه در آن شعاع می‌باشد. در عمل برای بدست آوردن D_2 نمودار دو لگاریتمی توابع انتگرال همبستگی در برابر r ترسیم و مقدار آن با محاسبه شیب بخش خطی نمودار بدست می‌آید. این بخش خطی دارای گستره‌ای بین حداقل و حداکثر r است که تحت عنوان گستره مقیاس بندی شناخته می‌شود. بعد فرکتالی مراکز سطحی زمین لرزه‌ها (D_e) بین ۰ تا ۲ متغیر است؛ مقادیر نزدیک به ۲ نشان دهنده پراکندگی یکنواخت رویدادها در سطح زمین و مقادیر نزدیک به ۰ بیانگر تمرکز مراکز سطحی زمین لرزه‌ها در نزدیکی یک نقطه یا وضعیت خوشه‌ای زمین لرزه‌هاست. اگر بعد فرکتالی مکانی محاسبه شده برای مراکز سطحی زمین لرزه‌ها نزدیک به ۱ باشد، بیانگر توزیع زمین لرزه‌ها به صورت خوشه‌های خطی است که می‌تواند مربوط به گسل‌های اصلی باشد (Dimiri, 2000) اما بعد فرکتالی زمان رویداد زمین لرزه‌ها بین ۰ تا ۱ متغیر است؛ مقادیر نزدیک به ۱ نشان دهنده پراکندگی یکنواخت رویدادها در محور زمان است. هر چه مقادیر بعد فرکتالی زمانی به ۰ نزدیک باشد بیانگر تمرکز زمین لرزه‌ها یا افزایش درجه خوشه‌بندی آنهاست (Zamani and Agh-Atabai, 2008).

پارامترها در زمان ترسیم شد (شکل ۴). برای ترسیم این نمودارها، مقادیر پارامترهای محاسبه شده برای هر پنجره زمانی در زمان انتهای پنجره قرار داده شده است.

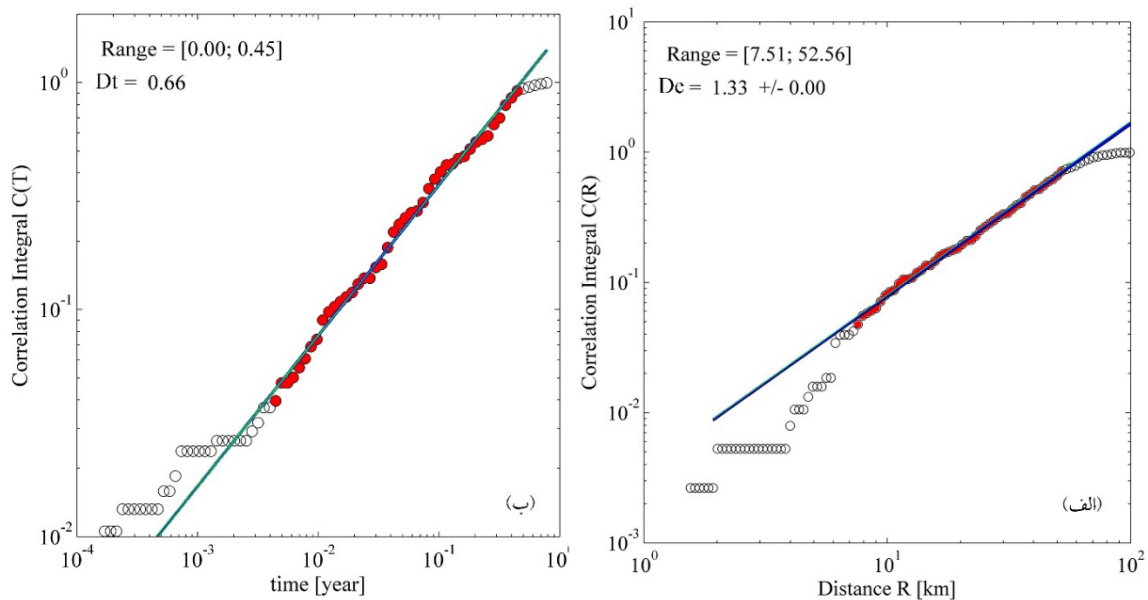
۵ بحث

نتایج تجزیه و تحلیل‌های تغییرات زمانی پیش از

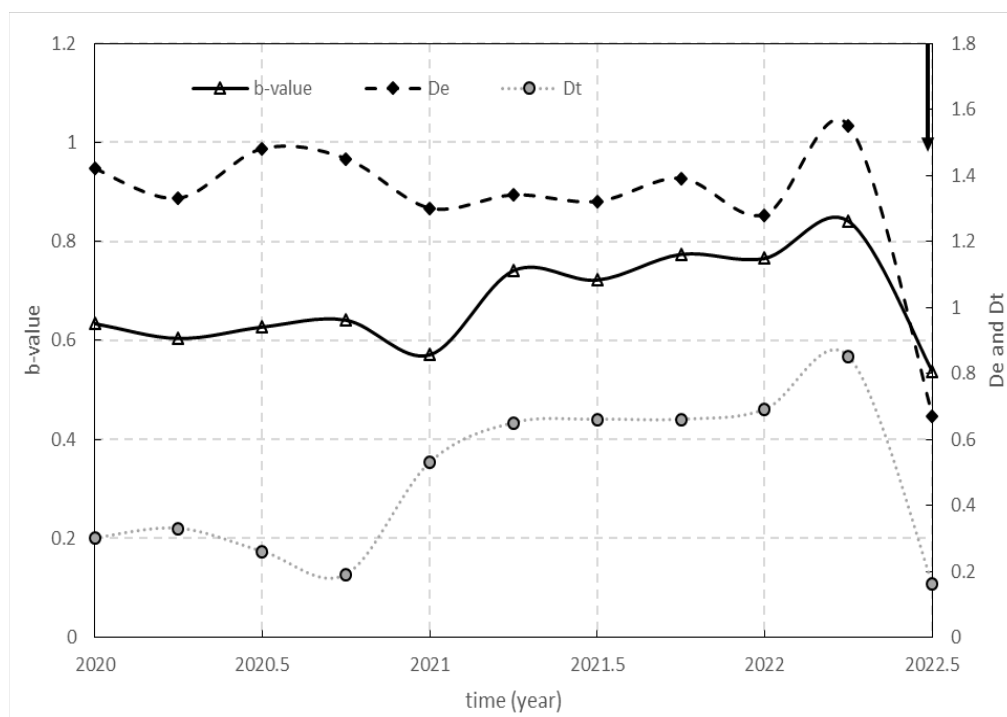
زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر نشان می‌دهد که مقدار Dt تا اواسط سال ۲۰۲۰ مقادیر بسیار کمی (حدود ۰/۳) را نشان می‌دهد که پیش از پایان سال به مقدار ۰/۲ نیز کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند حاکی از رخداد خوشه‌وار زمین‌لرزه‌ها در این بازه زمانی باشد. همانطور که در نمودارهای هیستوگرام نرخ ماهانه (شکل ۵-الف) و



شکل ۲. نمودار فراوانی بزرگی مجموعه زمین‌لرزه‌های دریافت شده از مرکز لرزه‌نگاری کشور، الف) در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا اواسط ۲۰۲۲، ب) پنجره زمانی ۲۰۲۰/۵ تا ۲۰۲۱/۵ در محدوده‌ای به مرکزیت زمین‌لرزه اول غرب بندر خمیر تا شعاع ۶۰ کیلومتر.



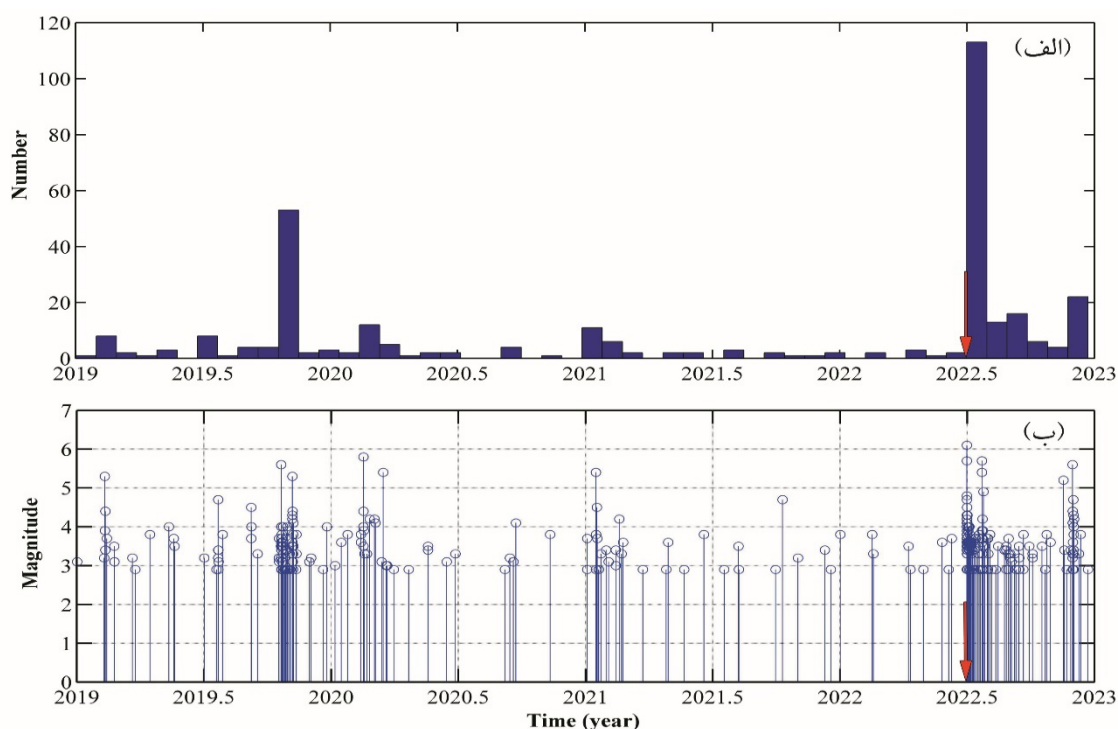
شکل ۳. نمونه‌ای از نمودارهای انتگرال همبستگی ترسیم شده برای محاسبه الف) بعد فرکتالی مراکز سطحی و ب) بعد فرکتالی زمان رویداد زمین‌لرزه‌ها در یک پنجره زمانی (از اواسط ۲۰۲۰ تا اواسط ۲۰۲۱).



شکل ۴. نمودارهای تغییرات زمانی پارامترهای لرزه‌خیزی شامل b-value و ابعاد فرکتالی مراکز سطحی (De) و زمان رویداد زمین لرزه‌ها (Dt) پیش از زمین لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر استان هرمزگان.

کاهش) بعد فرکتالی زمانی نشان داده است. افزایش ابعاد فرکتالی مراکز سطحی و زمان رویداد زمین لرزه‌ها در این بازه زمانی بیانگر کاهش توزیع خوشه‌ای رخداد زمین لرزه‌ها در مکان و زمان است. با توجه به هیستوگرام نرخ لرزه‌خیزی و نمودار بزرگا-زمان، نرخ لرزه‌خیزی در بازه زمانی اوایل ۲۰۲۱ تا اواسط ۲۰۲۲ (زمان رویداد زمین لرزه‌های غرب بندر خمیر) بسیار پایین و زمین لرزه‌ها در زمان بصورت پراکنده رخ داده‌اند و تفاوت قابل توجهی در دوره زمانی چند ماهه قبل از زمین لرزه‌های اصلی مشاهده نمی‌شود. میزان افت و خیز در نمودار تغییرات زمانی b-value نسبت به دو پارامتر فرکتالی کمتر است. با این وجود تغییرات این پارامتر را نیز می‌توان سه بخش تقسیم نمود: بخش ابتدای نمودار تا سال ۲۰۲۱ دارای روند نسبتاً پایدار با مقادیر حدود $0/6 (\pm 0/03)$ می‌باشد. سپس با افزایش در اوایل سال ۲۰۲۱ مقدار آن تا حدود $0/75$ رسیده و تا سال ۲۰۲۲ تقریباً بدون تغییر در همین مقادیر باقی مانده

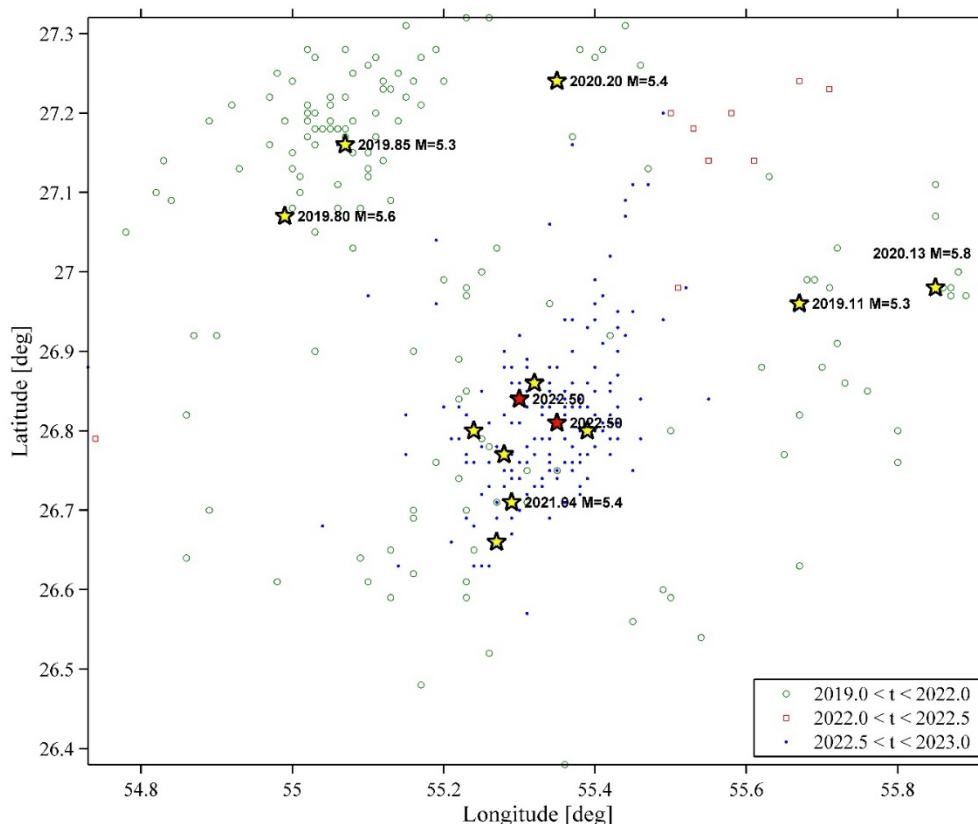
بزرگا-زمان (شکل ۵-ب) مشاهده می‌شود، در این بازه زمانی خوشه‌های لرزه‌ای متعددی در زمان‌های مختلف ایجاد شده است. به عنوان مثال در اواخر سال ۲۰۱۹ افزایش نرخ لرزه‌خیزی و تراکم نمودار بزرگا زمان دیده می‌شود. اما پس از سال ۲۰۲۱ الگوی لرزه‌خیزی متفاوت است. در سال ۲۰۲۱ مقدار این پارامتر به مقادیر حدود $0/6$ افزایش پیدا کرده است و تا قبل از سال ۲۰۲۲ روند نسبتاً پایداری را نشان می‌دهد. این مقدار پارامتر Dt بیانگر رخداد نسبتاً پراکنده‌تر زمین لرزه‌ها در زمان است. اما در پنجره زمانی پیش از رخداد زمین لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر، مقدار این پارامتر بطور قابل توجهی افزایش و با رخداد آنها به کمترین مقدار دوره کاهش یافته است. پارامتر بعد فرکتالی مراکز سطحی زمین لرزه‌ها تا پیش از سال ۲۰۲۲ یک روند نسبتاً پایدار با مقدار $1/4 \pm 0/1$ و افت و خیز حدود $0/1$ داشته و پس از آن در یک دوره زمانی چند ماهه درست پیش از زمین لرزه‌های اصلی الگوی مشابه (افزایش و سپس



شکل ۵. الف) هیستوگرام نرخ زمین‌لرزه‌ها، ب) نمودار بزرگ-زمان زمین‌لرزه‌های تا ۶۰ کیلومتری زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا اواسط ۲۰۲۳. فلش قرمز در هر دو نمودار زمان رخداد زمین‌لرزه‌های اصلی را نشان می‌دهد.

است. اما در مجموع این بازه زمانی، مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های در تمام منطقه مشاهده می‌شود (دایره‌های سبز در شکل ۶) که می‌توان آن را به عنوان لرزه‌خیزی پس‌زمینه در نظر گرفت. در دوره زمانی پس از زمین‌لرزه‌های اصلی، خوشه‌های پس‌لرزه‌ای در اطراف مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۲ هرزگان متمرکز شده‌اند (نقاط آبی رنگ در شکل ۶). اما در بازه زمانی چند ماه قبل از رویداد زمین‌لرزه‌های اصلی، الگوی توزیع مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها کاملاً متفاوت است. در این دوره زمانی، تعداد زمین‌لرزه‌ها بسیار کاهش پیدا کرده (که در شکل ۵ نیز مشهود است) و فقط در سمت شمال-شمال شرق مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های اصلی رخ داده‌اند (مربع‌های قرمز در شکل ۶). در این بازه زمانی، هیچ زمین‌لرزه‌ای در محل اطراف کانون سطحی زمین‌لرزه‌های اصلی مشاهده نمی‌شود. این الگوی توزیع زمین‌لرزه‌ها در زمان (شکل ۵) و مکان (شکل ۶) حاکی از برقراری یک

است. بعد از سال ۲۰۲۲ یعنی در پنجره قبل از رویداد زمین‌لرزه اصلی مقدار b -value نیز کم و بیش مشابه با ابعاد فرکتالی ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. برای درک بهتر این تغییرات در پارامترهای لرزه‌خیزی، نقشه زمین‌لرزه‌های محدوده مطالعه شده به تفکیک دوره‌های زمانی قبل از سال ۲۰۲۲ (دایره‌های سبز)، ۲۰۲۲ تا قبل از زمین‌لرزه‌های اصلی (مربع‌های قرمز) و پس‌لرزه‌ها (نقاط آبی رنگ) ترسیم شد (شکل ۶). این نقشه نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی مختلف الگوی توزیع مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها با یکدیگر تفاوت دارد. در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ مراکز سطحی زمین‌لرزه‌ها بصورت غیریکنواخت در تمام منطقه توزیع شده و در برخی محلها خوشه‌های لرزه‌ای تشکیل شده است. از جمله این خوشه‌های لرزه‌ای می‌توان به خوشه لرزه‌ای مرتبط با زمین‌لرزه‌های اواخر سال ۲۰۱۹ اشاره کرد که در سمت شمال‌غرب کانون سطحی زمین‌لرزه‌های اصلی تشکیل شده



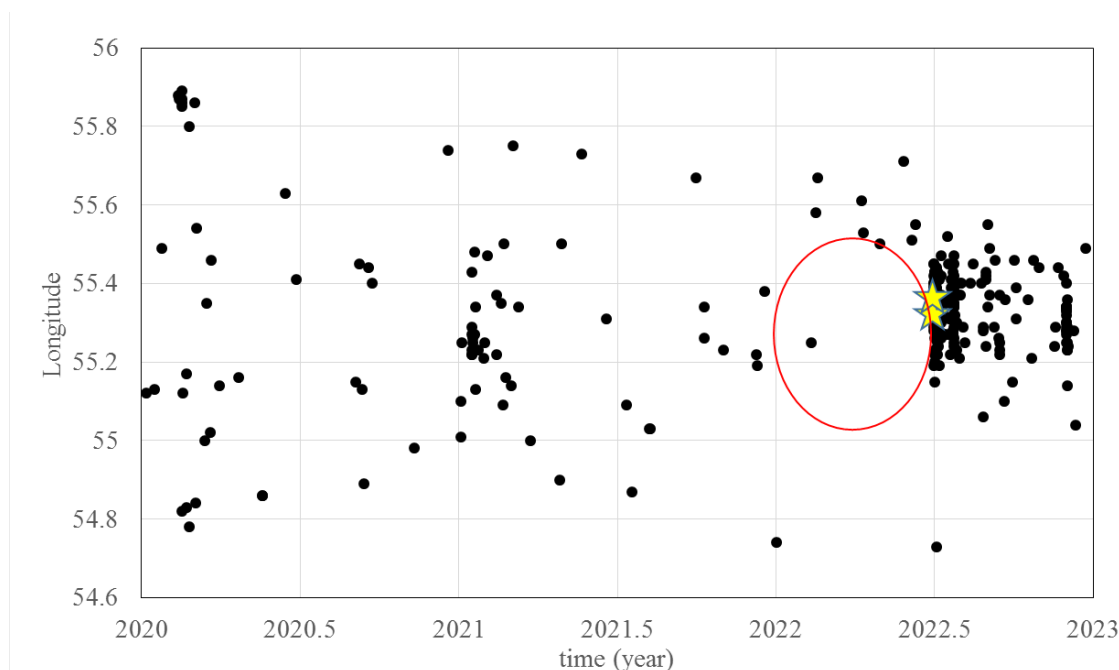
شکل ۶. نقشه لرزه‌خیزی منطقه مطالعه شده (دایره‌ای به مرکزیت زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۲ هرمزگان تا شعاع ۶۰ کیلومتر) که در آن زمین‌لرزه‌های بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ با دایره‌های سبز، ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۲/۵ با مربع‌های قرمز و پس‌لرزه‌ها با نقاط آبی مطابق راهنما نشان داده شده است. ستاره‌های قرمز رنگ زمین‌لرزه‌های اصلی و زرد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ را نشان می‌دهند.

اواسط سال ۲۰۲۱ میلادی تعداد زمین‌لرزه‌ها بسیار کاهش پیدا کرده، اما چند ماه قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های اصلی یک دوره آرامش لرزه‌ای در اطراف زمین‌لرزه اصلی حاکم بوده است. اما در همان زمان با این آرامش لرزه‌ای در شمال منطقه لرزه‌خیزی تداوم داشته است. دوره آرامش لرزه‌ای با بیضی قرمز رنگ مشخص شده است. چنین تغییراتی در پژوهش‌های پیشین بر روی زمین‌لرزه‌های دیگر در این منطقه و سایر مناطق ایران نیز مشاهده شده است. به عنوان مثال، اُمی و میرونوف (Omami and Smironov, 2024) نیز با استفاده از روش RTL قبل از زمین‌لرزه‌های ۲۰۲۱ فین یک دوره آرامش لرزه‌ای گزارش کرده‌اند. پیش از زمین‌لرزه بلده-کجور در دامنه شمال البرز هم با استفاده از

دوره آرامش لرزه‌ای (کاهش نرخ لرزه‌خیزی در مقایسه با لرزه‌خیزی پس‌زمینه) در بازه زمانی چند ماهه پیش از رویداد زمین‌لرزه اصلی است. برای بررسی بیشتر این الگوهای لرزه‌خیزی، نمودار زمان-مکان لرزه‌خیزی محدوده مطالعه شده نیز ترسیم شد (شکل ۷). بر اساس پژوهش یانگ و همکاران (Yang et al., 2023) با استفاده از روش INSAR و حل سازوکار کانونی (GCMT) زمین‌لرزه‌های دوگانه غرب بندر خمیر بر روی گسل تراستی با روند تقریبی شرقی-غربی رخ داده است که باعث چین‌خوردگی مرتبط با گسل در تاق‌دیس بندر عباس شده است. لذا در پژوهش حاضر، نمودار مکان-زمان بر مبنای طول جغرافیایی ترسیم شد. بر اساس این نمودار از

میان مدت زمین لرزه‌های ۲۰۲۲ غرب بندر خمیر استان هرمزگان معرفی کرد. از طرفی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نمودارهای تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی و مکان-زمان نسبت به دیگر نمودارها بهتر می‌تواند الگوهای پیش‌نشانگری را نمایش دهد.

محاسبه پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی آرامش لرزه‌ای مشاهده و گزارش شده است (Agh-Atabai and Mirabedini, 2013). به نظر می‌رسد تغییرات معنادار پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی در زمان حدود چند ماه پیش از رویداد زمین لرزه اصلی به دلیل آرامش لرزه‌ای حاکم بر منطقه است که می‌توان آن‌ها را به عنوان پیش‌نشانگر



شکل ۸. نمودار مکان زمان لرزه‌خیزی محدوده مطالعه شده که در آن کانون سطحی یکی از زمین لرزه‌های اصلی (ستاره زرد) و دوره آرامش پیش از آن (دایره قرمز) نشان داده شده است.

که افزایش ابعاد فرکتالی زمین لرزه‌ها در دوره زمانی چند ماهه پیش از رخداد زمین لرزه‌های اصلی به دلیل حاکم بودن یک دوره آرامش لرزه‌ای در حوال این زمین لرزه‌هاست. لذا با توجه به تغییرات معنا دار این پارامتر در زمان حدود چند ماه پیش از رویداد زمین لرزه اصلی می‌توان آن را به عنوان پیش‌نشانگر میان مدت زمین لرزه‌های منطقه معرفی کرد.

منابع

Agh-Atabai, M., Mirabedini M.S., 2013, Temporal variations of seismicity parameters in the Central Alborz, Iran. Acta Geophysica 62(3), 486–504.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوی لرزه‌خیزی پیش از زمین لرزه‌های سال ۲۰۲۲ میلادی غرب بندر خمیر در استان هرمزگان مطالعه شد. برای این منظور تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی لرزه‌خیزی b-value و ابعاد فرکتالی مراکز سطحی، D_e و زمان رویداد زمین لرزه‌ها، D_t در یک دوره سه ساله پیش از زمین لرزه‌های اصلی بررسی شد. در نمودارهای تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی قبل از توالی زمین لرزه‌های غرب بندر خمیر الگوی مشخصی از تغییرات مشاهده می‌شود. با مقایسه نمودارهای تغییرات زمانی پارامترهای فرکتالی با نقشه لرزه‌خیزی و نمودار مکان-زمان منطقه مشخص شد

- Aki K., 1965, Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log_{10}N=a-bM$ and Its Confidence Limits. *Bulletin of Earthquake Research*, 43, 237-239.
- Ashkenazy Y., Ivanov P., Havlin S., Peng, C.K., Goldberger, A.L., Stanley, H.E., 2001, Magnitude & sign correlations in heartbeat fluctuations. *Physical Review Letter*, 86, 1900-1903.
- Aubourg C., Smith B., Bakhtari H.R., Guya N., Eshraghi A., 2008, Tertiary block rotations in the Fars Arc (Zagros, Iran). *Geophysical Journal International*, 173, 659-673.
- Bak P., Tang C., 1989, Earthquakes as self-organized critical phenomena. *Journal of Geophysical Research*, 94, 15635-7.
- Bayrak E., Yilmaz S.H., Bayrak Y., 2017, Temporal and spatial variations of Gutenberg-Richter parameter and fractal dimension in Western Anatolia, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138:1-11.
- Dimiri V. P., 2000, Application of fractals in the earth sciences, A. A. Balkema, Rotterdam, 157: 1405-1393.
- Eslami A., And Taghaboni M., 2022, Preliminary report of 2022 earthquakes, west of Bandar Khmeir, Hormozgan province. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian)*.
- Grassberger P., Procaccia I., 1983, Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica, D* (9): 189-208.
- Gutenberg B., Richter C.F., 1954, *Seismicity of the Earth and Associated Phenomenon*, second edition, Princeton University Press, Princeton.
- IRSC, Iranian Seismological Center, <http://irsc.ut.ac.ir>
- Kadinsky-Cade K., Barazangi M., 1982, Seismotectonics of southern Iran: the Oman line, *Tectonics*, 1 (5): 389-412, doi: 10.1029/TC001i005p00389.
- Kagan Y., Jackson D., 1991, Long-term earthquake clustering. *Geophys. J. Int.* 104, 117-133.
- Mandelbrot B., 1982, *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman & Co., San Francisco.
- Mittag R.J., 2003, Fractal analysis of earthquake swarms of Vogtland/ NW-Bohemia intraplate seismicity. *J. Geodynamics*, 35, 173-189.
- Mogi K., 1985, *Earthquake prediction*. Academic Publishing, Tokyo.
- Molinaro M., Guezou J.C., Leturmy p., Eshragh S.A., Frizon de Lamotte D., 2004, The origin of changes in structural style across the Bandar Abbas syntaxis, SE Zagros (Iran). *Marine. Petr. Geol.*, 21:735-752.
- Ommi S., and Smirnov V.B., 2024, Seismicity patterns before the 2021 Fin (Iran) doublet earthquakes using the region-time length and time-to-failure methods. *Earthquake Science*, 37(4): 324-336, doi: 10.1016/j.eqs.2024.04.005.
- Regard V., Hatzfeld D., Molinaro M., Aubourg C.H., Bayer O., Yaminifard F., 2010, The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation. *Special Publication of Geological Society of London* (330) pp.41-64.
- Scholz C.H., 2002, *The mechanics of earthquake and faulting*, Cambridge university press.
- Smalley R.F., Chatelain J.L., Turcotte D.L., Pre' vot R., 1987, A fractal approach to the clustering of earthquakes: application to the seismicity of the New Hebrides. *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 1368-1381.
- Telesca L., Nikolitanga I., Vallianatos F., 2006, Time-scaling analysis of southern Aegean seismicity: Chaos, Solitons and Fractals, v. 28, p.361-366.
- Turcotte D., 1992, *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.
- Wiemer S., and Wyss M., 2000, Completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90 (4), 859-869.
- Wiemer S., 2001, A software package to analyze seismicity; Zmap, *Seismological Research Letter*, 72(3):373-382.

- Yaminifard F, Hatzfeld D., Farahbod A.M., Paul A., Mokhtari M., 2007, The diffuse transition between the Zagros continental collision and the Makran oceanic subduction (Iran): microearthquake seismicity and crustal structure. *Geophysical Journal International*, 170:182-194.
- Yang Y.H., Li X, Hu J.C., Song J., Zhao J., Yassaghi A., Pathier E., Xu Q., Chen Q., 2023, The 2022 Hormozgan Doublet Earthquake: Two Blind Thrusts-Related Folding in Zagros Fold-And-Thrust Belt, Southeast Iran. *Geophysical Research Letter*, 50 (4): 1-12. Doi: 10.1029/2022GL101902.
- Zamani A., and Agh-Atabai M., 2008, Quantification of the Spatial-Temporal distribution of aftershocks associated with the 2006 Darb-e-Astaneh (Silakhor) earthquake, western Iran, *Geosciences*, 65: 70-79 (in Persian).

Fractal nature of seismicity pattern prior to the 2022 Hormozgan Doublet earthquakes, southeast Iran

Maryam Agh-Atabai ^{1*} and Fatemeh Msnchar ²

¹Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Iran

²M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Golestan University, Iran

(Received: 31 July 2024, Accepted: 08 September 2024)

Summary

One of the goals of seismicity pattern studies is to find a precursor pattern prior to large earthquakes with the aim of their prediction. Foreshocks, doughnut pattern and seismic quiescence are seismic patterns that can be used as predictors in the short-term, medium-term and long-term period before earthquakes event (Mogi, 1985; Scholz, 1988). Researchers have shown that seismic parameters shows significant changes before the occurrence of earthquakes (Bayrak et al., 2017). Investigating temporal changes of seismicity fractal parameters is one of the ways to find seismic pattern in periods before large earthquakes. In this research, the seismicity pattern before the 2022 Hormozgan (west of Bandar-e Khmir) earthquakes have been investigated using fractal methods. These earthquakes with moment magnitude (M_w) of more than 6 occurred on a dense seismic zone with a northeast-southwest trend at the southeast end of the Zagros fold-thrust belt. In this article, to investigate the precursory pattern, temporal changes of seismicity fractal parameters, including b-value, fractal dimension of earthquake epicenters, D_e , and fractal dimension of earthquake occurrence times, D_t , were studied in a 3.5-years period before 2022 Hormozgan earthquakes. The correlation integral method was used to calculate the spatial and temporal fractal dimensions (Grassberger and Procaccia, 1983). The data used in this research (a circular area centered on the epicenter of the first event with a radius of 60 km) was extracted from Iranian Seismological Center (IRSC). The completeness Magnitude, M_c , was calculated 2.9 using the frequency-Magnitude curve, therefore earthquakes smaller than 2.9 were excluded from catalogue for subsequent fractal calculations. In this article, a fixed window method with a length of one year and steps of three months was used to investigate the temporal changes of the seismicity pattern. For each of the windows, three parameters b-value, D_e and D_t were calculated and graphs of their temporal changes were drawn. The results showed that until 2021 (1.5 years before the target earthquake event), the fractal parameters show changes corresponding to the occurrence of numerous earthquake clusters in this time period. Between the years 2021 and 2022, the change trend of two parameters b-value and D_t has been relatively stable after a significant increase. Then, all three seismic parameters have shown a similar pattern (increasing value) in a period of several months before the main events. The monthly seismicity rate histogram and magnitude time graph show that the seismicity rate from the beginning of 2021 until the 2022 Hormozgan earthquakes is very low and the distribution of earthquakes is scattered in time. But the space-time diagram shows that several months before the occurrence of the main earthquakes, there is a period of seismic quiescence around the main earthquake and at the same time, the seismicity continued in the north of the epicenter. It seems that the significant temporal changes of seismicity fractal parameters before the main earthquakes are due to the seismic quiescence, which can be considered as medium-term precursor of the 2022 Hormozgan earthquakes.

Keywords: Precursor, seismicity pattern, clustering, transition zone, Zagros