

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

در این تحقیق، الگوی مهاجرت زلزله‌های متوالی^۱ رخ داده در ناحیه زاگرس، در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۹ و برای زلزله‌های با بزرگای مساوی و بیش از ۴/۵ ریشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، زمان بین رخداد^۲، فاصله مهاجرت رومرکزی و راستای مهاجرتی زلزله‌های متوالی، برای زلزله‌های با بزرگای مساوی و بیش از ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵ محاسبه شده و توزیع آماری این داده‌ها مورد تحلیل و مدل‌سازی آماری قرار گرفته است. بررسی توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله‌ها حاکی از تطابق خوب این داده‌ها با توزیع‌های آماری گاما^۳ و ویبول^۴ است. داده‌های فاصله مهاجرتی زلزله‌ها نیز به خوبی الگوی کاهشی، مشابه با توزیع زمان بین رخدادی زلزله‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، داده‌های روند مهاجرت زلزله‌های متوالی نیز الگویی کاملاً هم‌راستا با روند کلی گسل‌های فعال ناحیه زاگرس را نشان می‌دهد که تأیید کننده این نظر است که فعال شدن قطعات مجزای سیستم‌های گسلی در این ناحیه، نقش اصلی را در توالی زمانی و مکانی رخداد زلزله‌ها ایفا می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند گامی مؤثر برای شناخت بهتر الگوی زمانی- مکانی لرزه‌خیزی در ناحیه زاگرس و تلاشی برای دستیابی به پیش‌بینی زلزله در مقیاسی ناحیه‌ای محسوب شود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی آماری، زمان بین رخدادی زلزله‌ها، توزیع آماری زلزله‌ها، مهاجرت زلزله‌های متوالی، لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساخت، ناحیه زاگرس.

مدل‌سازی آماری الگوی مهاجرتی رخداد زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس

سید ناصر هاشمی

استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان،
دامغان، ایران، hashemi@du.ac.ir

۱- مقدمه

زلزله است. هدفی که اگر بشر حتی با درجات کمی از دقت هم به آن دست یابد، می‌تواند به طور چشمگیری از خسارات جانی و مالی زلزله‌ها بکاهد. مطالعه الگوی رخداد زلزله‌ها با مشکلات متعددی همراه است. بخشی از این مشکلات به عدم شناخت کافی ما از فرایند رخداد زلزله مربوط می‌شود. بخش دیگری از این مشکلات به عدم دسترسی به داده‌ها و اطلاعات کافی و دقیق برمی‌گردد. انتظار می‌رود با به کارگیری روش‌های جدید تحلیل داده‌ای و مدل‌سازی‌های کاربردی، بتوان به ساختار پنهان داده‌ها دست یافت که خود گامی سودمند برای فهم بهتر فرایندها و دست‌یابی به پیش‌بینی رخدادهاست.

از دیدگاه علم زمین‌آمار، زلزله را می‌توان یک فرایند نقطه‌ای تصادفی^۷ قلمداد نمود که می‌توان توزیع آن را در مکان

زلزله‌ها حاصل آزاد شدن تنش ذخیره شده در سنگ‌کره^۵ زمین هستند. دانش امروز بشر در مورد فیزیک گسلش حین رخداد زلزله و ساختار هندسی و الگوی قطعه‌بندی^۶ گسل‌های مسبب زلزله، به طور چشمگیری افزایش یافته است. با این حال، هنوز دانش ما در مورد شناخت فرایندهای فیزیکی دخیل در رخداد زلزله‌ها بسیار ناقص است. همین عامل باعث شده است، رفتار زمانی لرزه‌خیزی نواحی فعال و به خصوص الگوی زمانی رخداد زلزله‌های بزرگ که از اهمیت بالایی برخوردار است، همچنان برای ما ناشناخته بماند [۱]. زلزله به عنوان یک رخداد تصادفی زمانی- مکانی همواره مورد توجه محققان علم آمار و مدل‌سازی داده‌ها بوده است. یافتن نظم حاکم بر الگوی زمانی و مکانی رخداد زلزله‌ها گامی مهم و مؤثر در دستیابی به پیش‌بینی

و زمان (و یا هر دو به صورت توأم با هم) مورد تحلیل آماری و مدل سازی قرار داد. امروزه داده های لرزه خیزی، به خصوص در نواحی با فعالیت لرزه ای زیاد مانند زاگرس، از دقت کافی هم در بعد مکان (ثبت موقعیت رومرکز و کانون) و هم در بعد زمان (ثبت دقیق زمان رخداد) زلزله ها، برخوردار است که ما را قادر می سازد با به کارگیری روش های تحلیل داده ای و استفاده از نرم افزارها برای سرعت بخشی به پردازش داده ها، به نتایج شگفت انگیزی دست یابیم. در این راستا برخی از محققین معتقدند که بررسی و تحلیل آماری زمان بین رخدادی زلزله های با بزرگای کوچک تا متوسط، می تواند راهی برای پیش بینی زلزله های با بزرگای بیشتر محسوب شود [۲-۳].

تحلیل آماری و مدل سازی داده های مرتبط با زمان بین رخدادی زلزله های متوالی بزرگ در نواحی مختلف دنیا، موضوع بسیاری از پژوهش ها در دهه های اخیر بوده است. پاساری و دیکشیت [۴] به بررسی توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله ها در شمال غربی هند پرداختند. ایشان با بررسی همخوانی ۱۳ مدل توزیعی مختلف با داده ها، دریافتند که بهترین همخوانی این داده ها با مدل توزیع نمایی^۸ است. گودانو [۵] با بررسی زمان بین رخدادی زلزله های کالیفرنیا، ژاپن و ایتالیا چنین نتیجه گرفت که این داده ها بهترین همخوانی را با مدل توزیع گاما نشان می دهند. هینزل و همکاران [۶] با استفاده از بررسی ها و تحلیل توزیع زمان بین رخدادی زلزله ها به تخمین لرزه خیزی پس زمینه پرداختند و اذعان داشتند که زمان بین رخدادی زلزله های بزرگ به خوبی با مدل توزیع آماری گاما مطابقت نشان می دهد. طلبی و همکاران [۳، ۷] بر اساس زمان بین رخدادی زلزله ها، مدل جدیدی از پیش بینی زلزله را پیشنهاد دادند. ایشان در ناحیه ترکیه و مناطق اطراف آن، به پیش بینی لرزه خیزی ناحیه، بر اساس آماره نسبت میانگین زمان بین رخدادی زلزله ها پرداختند و اذعان کردند که این آماره می تواند به عنوان یک متغیر پیش نشانگر^۹ در پیش بینی زلزله های بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

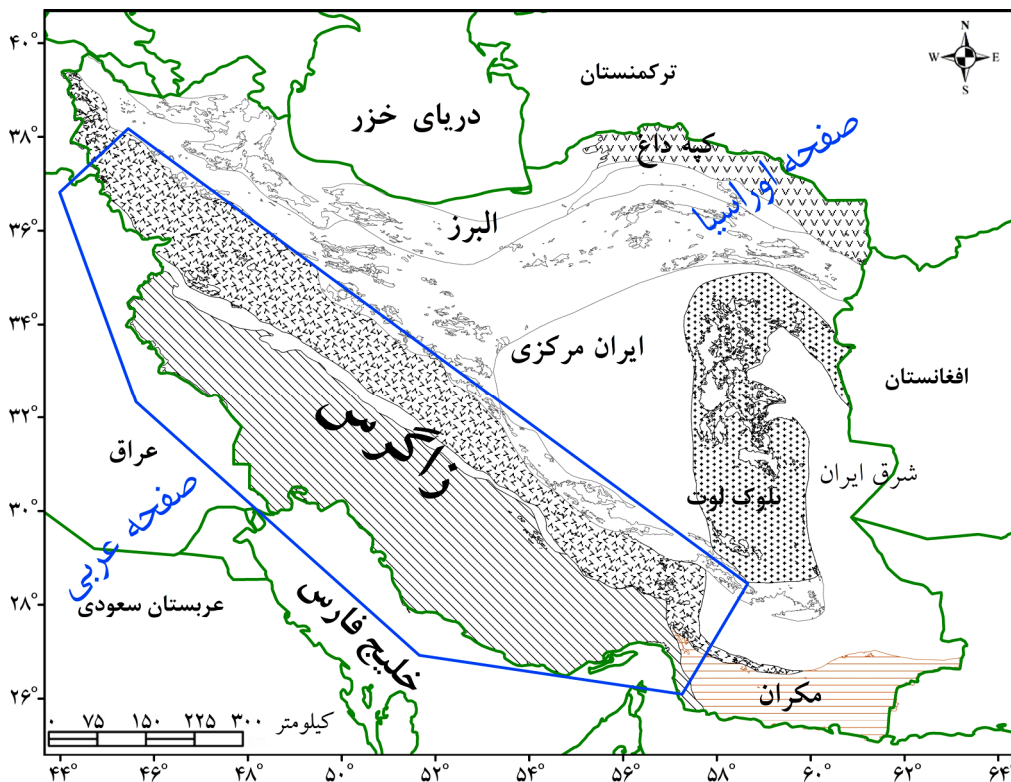
۲- لرزه زمین ساخت و لرزه خیزی زاگرس

پهنه زاگرس (شکل ۱) یکی از فعال ترین نواحی لرزه خیز دنیا است. در طی دهه های گذشته زلزله های مخرب زیادی در این پهنه رخ داده است که از جمله آخرین این زلزله ها می توان به زلزله سر پل ذهاب (۲۱ آبان ۱۳۹۶ با بزرگای ۷/۳) اشاره نمود.

لرزه زمین ساختی ایران و برای بازه های مختلف بزرگی پرداختند و پارامترهای آماری برخی از توزیع های آماری مهم را برای این داده ها برآورد نمودند. بر اساس یافته های ایشان، برای ناحیه زاگرس توزیع های آماری گاما و ویول، بیشترین همخوانی را با توزیع زمان بین رخدادی داده های بیش از ۴/۵ و توزیع های نمایی و گاما، بیشترین همخوانی را با داده های بیش از ۵/۰ نشان می دهند. یافته های آنها حکایت از آن دارد که با تغییر بزرگای حد پایین زلزله ها، مدل توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله ها تغییر می کند. همچنین، رستمی و همکاران [۹] با استفاده از روش تحلیل سری های زمانی به بررسی و مطالعه الگوی لرزه خیزی در ناحیه زاگرس پرداختند. علاوه بر موارد اشاره شده، بررسی الگوی زمانی رخداد زلزله ها و بررسی توزیع آماری زمان بین رخدادها در زلزله های بزرگ رخ داده در نواحی مختلف دنیا، موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است [۱۰-۱۲]. مبانی تئوری توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله ها تحت شرایط ایستا^{۱۰} به طور کامل توسط مولچان [۱۳] شرح داده شده است. همچنین، لازم به ذکر است، بر اساس یافته های محققان پیشین، به نظر می رسد الگوی توزیع زمان بین رخدادی زلزله ها به عواملی چون وسعت ناحیه یا منطقه مورد مطالعه، ویژگی های لرزه زمین ساختی نواحی و محدوده بزرگی زلزله های مورد مطالعه وابسته است [۱۴].

در این تحقیق با فرض اینکه گستره زاگرس به عنوان یک پهنه لرزه زمین ساختی مجزا، رفتار لرزه خیزی مستقل و متمایزی نسبت به نواحی مجاور خود نشان می دهد، به بررسی الگوی زمان بین رخداد زلزله های بزرگ در این ناحیه پرداخته شده است و همچنین برای اولین بار الگوی مهاجرتی (مکانی و راستایی) این زلزله های بزرگ مطالعه شده است.

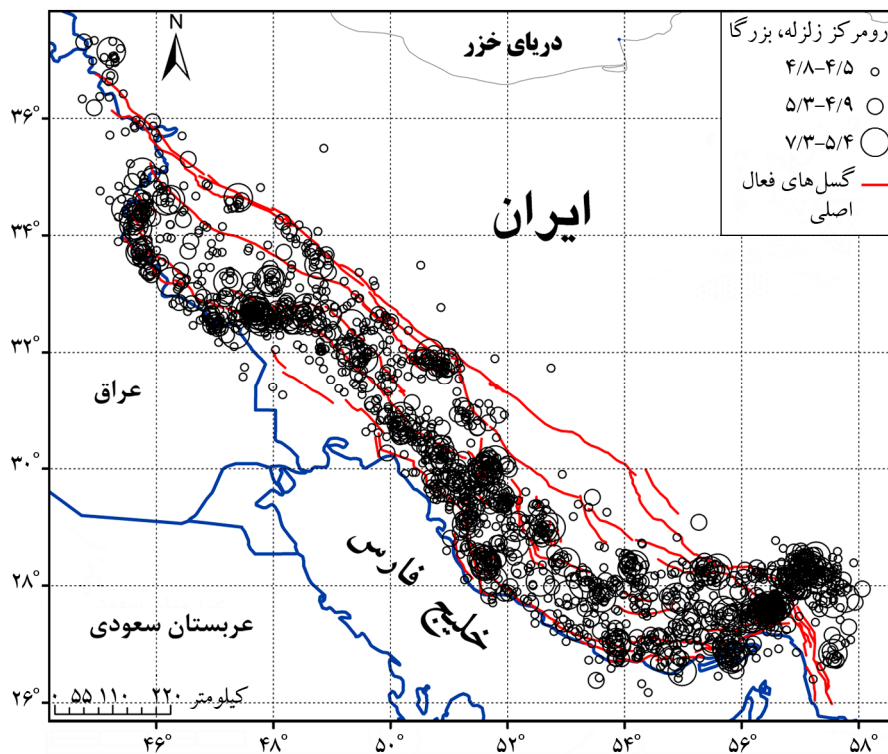
در ایران، طاهرنیا و همکاران [۸] به مدل سازی آماری توزیع زمان بین رخدادی زلزله های رخ داده در پهنه های مختلف



شکل (۱): نقشه ساختاری ایران که در آن پهنه های مختلف ساختاری ایران نشان داده شده و موقعیت تقریبی ناحیه مورد مطالعه در این تحقیق، نشان داده شده است.

مختلف ساختاری ایران و همچنین موقعیت تقریبی ناحیه زاگرس، به عنوان ناحیه مورد مطالعه در این تحقیق، نشان داده شده است. اگرچه کل ناحیه زاگرس از نظر لرزه خیزی فعال محسوب می شود، لیکن رفتار لرزه خیزی در بخش های مختلف این پهنه یکسان نیست. زلزله های رخ داده در این گستره عمدتاً کم عمق (با عمق کانونی کمتر از ۷۰ کیلومتر) بوده و به ندرت شاهد رخداد زلزله های بزرگ در این ناحیه هستیم. لرزه خیزی این ناحیه حاصل فعالیت گسل های بنیادی جنوب و بزرگ در این پهنه و بسیاری از گسل های فعال پوشیده ی دیگر است. مطالعه ی تاریخچه ی لرزه خیزی زاگرس، نشان دهنده ی تمرکز بالای رومرکز زمین لرزه های رخ داده در این پهنه است به گونه ای که در مقایسه با سایر نواحی ایران دارای بیشترین فراوانی بوده و در تمام سطح این گستره پراکنده می باشند. گسل های فعال این ناحیه عمدتاً سازوکار معکوس (با روند غالب شمال غرب - جنوب شرق) و امتداد لغز (با روند غالب شمالی - جنوبی) و یا ترکیبی از این دو را داشته و در موارد بسیاری زلزله خیزی در این ناحیه با گسلش پنهان و بدون گسیختگی سطحی همراه است (شکل ۲).

کمر بند چین خورده - رانده ی زاگرس با امتداد کلی NW-SE در حاشیه ی شمال شرق صفحه عربی، بر روی پی سنگ دگرگون شده پرکامبرین قرار دارد که حاصل همگرایی مایل بین صفحات عربی و اوراسیا با روند N-S و با سرعت حدود ۲۵ تا ۳۵ میلی متر در سال است [۱۵]. نرخ کوتاه شدگی در بخش های مختلف ناحیه زاگرس متفاوت بوده و بر اساس اندازه گیری های GPS این نرخ از شمال غرب به جنوب شرق افزایش می یابد [۱۶]. این کمر بند در شمال غرب باریک تر بوده و دارای وسعت حدود ۲۰۰ کیلومتر می باشد، در صورتی که به سمت جنوب شرق وسیع تر شده و پهنای آن به حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتر می رسد [۱۵]. طول این کمر بند چین خورده - رانده حدود ۱۸۰۰ کیلومتر بوده و از کوه های تاروس در ۳۰ کیلومتری گسل شرق آناتولی در شمال شرق ترکیه، شروع شده و از عراق و جنوب غربی ایران و تنگه ی هرمز گذشته و به خط شمالی - جنوبی عمان می رسد که این ناحیه را از ناحیه مکران جدا می کند [۱۷]. در شکل (۱) نقشه ساختاری و زمین ساختی ایران ارائه شده است که در آن پهنه های



شکل (۲): نقشه توزیع مکانی رومرکز زلزله‌ها (در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی) به همراه گسل‌های فعال اصلی ناحیه مورد مطالعه.

۳- تئوری و روش تحقیق

زلزله‌های ناحیه زاگرس با مدل‌های مهم توزیع آماری پیوسته، مورد ارزیابی قرار گرفته است. از دیدگاه آماری داده‌های زمان بین رخداد زلزله‌ها، داده‌هایی پیوسته محسوب می‌شوند که می‌توان از مدل‌های آماری توزیع پیوسته برای برازش و ارزیابی همخوانی آنها کمک گرفت. چهار مدل توزیع آماری مهم که توسط محققان پیشین برای مدل‌سازی داده‌های زمان بین رخدادی زلزله‌ها بیشتر مورد توجه و استفاده قرار گرفته است، عبارتند از: توزیع لاگ نرمال^{۱۱}، توزیع نمایی، توزیع ویبول و توزیع گاما. در جدول (۱) معادله تابع توزیع و پارامترهای چهار مدل توزیع آماری مورد استفاده در این تحقیق به همراه پارامترهای شاخص این مدل‌ها ارائه شده است.

در شکل (۳) مفاهیم زمان بین رخداد، فاصله مهاجرتی و روند مهاجرت زلزله‌های متوالی به سادگی نمایش داده شده است. در این تحقیق، داده‌های زمان بین رخداد زلزله‌های بزرگ رخ داده در زاگرس، با چهار مدل توزیع آماری برازش شد و پارامترهای این مدل‌های توزیعی برآورد شد.

مطالعه الگوی زمانی-مکانی رخداد زلزله‌های متوالی در یک ناحیه موضوع بسیاری از پژوهش‌ها در دهه‌های اخیر بوده است. محققان زیادی به بررسی و مدل‌سازی آماری زمان بین رخدادی زلزله‌های بزرگ در نواحی مختلف لرزه‌خیز دنیا پرداخته‌اند. زمان بین رخدادی به عنوان مدت‌زمان انتظار بین دو زلزله متوالی در یک ناحیه یا منطقه، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (1)$$

مقادیر زمان بین رخدادی زلزله‌ها، به بزرگای زلزله‌ها وابسته است. انتظار می‌رود زلزله‌های با بزرگای بیشتر با فواصل زمانی بیشتری نسبت به هم رخ دهند. الگوی آماری توزیع زمان بین رخدادی در زلزله‌های یک ناحیه تا حدود زیادی به ویژگی‌های لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساختی آن ناحیه وابسته است. مدل‌سازی این زمان‌های بین رخدادی می‌تواند شناخت ما را از ویژگی‌های لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساختی نواحی لرزه‌خیز افزایش دهد. در این تحقیق، همخوانی داده‌های زمان بین رخدادی

جدول (۱): معادله تابع چگالی احتمال چهار مدل توزیع آماری مورد استفاده در این تحقیق به همراه پارامترهای شاخص این مدل‌ها.

پارامترها	معادله تابع چگالی احتمال	توزیع
$\mu = \text{Mean}$ $\sigma = \text{Standard Deviation}$	$f_{(x)} = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(x) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right)$	توزیع لاگ نرمال
$\lambda = \text{Rate}$	$f_{(x)} = \lambda e^{-\lambda x}$	توزیع نمایی
$\lambda = \text{Scale}$ $k = \text{Shape}$	$f_{(x)} = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{(k-1)} e^{-\left[\frac{x}{\lambda}\right]^k}$	توزیع ویبول
$\theta = \text{Scale}$ $k = \text{Shape}$	$f_{(x)} = x^{k-1} \frac{\exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\Gamma(k)\theta^k}$	توزیع گاما

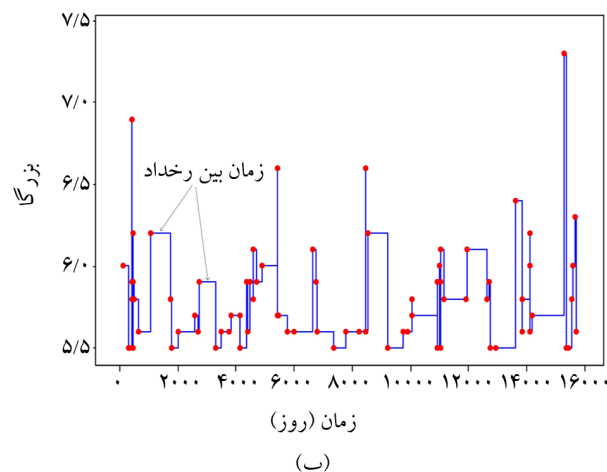
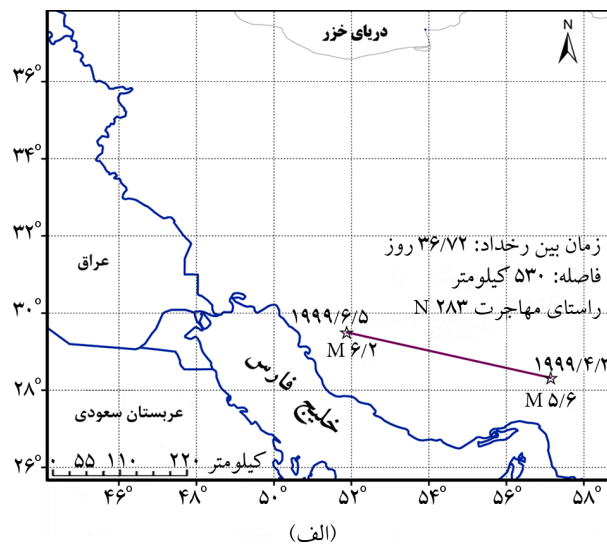
می‌توان به تفسیر این داده‌ها و تحلیل آماری آنها پرداخت. به علاوه، راستای مهاجرتی زلزله‌های متوالی رخ داده نیز داده‌های جهت‌محسوب می‌شوند که می‌توانیم از آمار جهت‌ی برای نمایش داده‌ها و تحلیل آنها و از جمله برای تعیین روند غالب مهاجرت‌ها کمک بگیریم.

۴- تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، زلزله‌های رخ داده در ناحیه زاگرس و در بازه زمانی آغاز سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی و با بزرگای مساوی و بیش از ۴/۵ (به تعداد ۱۸۳۱ زلزله) را شامل می‌شود که از پایگاه داده‌ای USGS دریافت شده است. نقشه رومرکز زلزله‌های مورد مطالعه و توزیع بزرگی آنها به همراه موقعیت گسل‌های فعال اصلی ناحیه در شکل (۲) نشان داده شده است. در این تحقیق، مقادیر سه کمیت زمان بین رخدادی، فاصله مهاجرتی و روند مهاجرت زلزله‌های متوالی رخ داده در ناحیه زاگرس و با بزرگی‌های حد پایین ۱۲ متفاوت ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵ محاسبه گردید. در شکل (۴) الگوی مهاجرتی رخداد زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس برای بزرگی‌های حد پایین مختلف نمایش داده شده است.

۴-۱- تحلیل آماری زمان بین رخدادی زلزله‌های متوالی

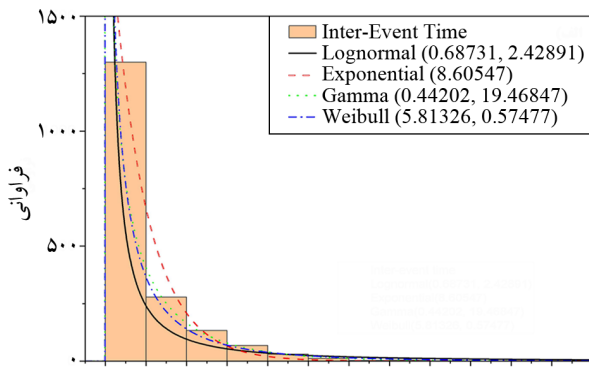
در این تحقیق، هدف اصلی بررسی الگوی توزیع زمان بین رخدادی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس بوده است. بدین منظور، زمان بین رخدادی زلزله‌های متوالی با بزرگای حد پایین ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵ (بر حسب روز) محاسبه گردید.



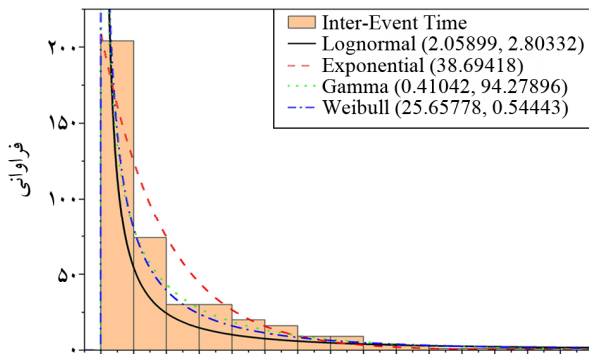
شکل (۳): (الف) مفهوم مهاجرت زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس و (ب) نمودار توزیع زمان بین-رخداد زلزله‌های با $M \geq 5/5$ رخ داده در ناحیه زاگرس، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.

فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی نیز داده‌هایی پیوسته محسوب می‌شوند که با بررسی نمودار توزیع آماری آنها

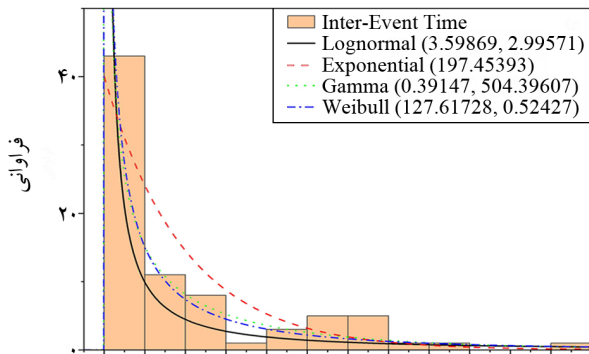
سپس توزیع آماری این مقادیر، با توجه به چهار مدل توزیع آماری معرفی شده در بالا مدل سازی شده و پارامترهای آماری توزیع ها برآورد شد. در شکل (۵) نمودار توزیع فراوانی مقادیر زمان بین رخدادی زلزله ها و مدل های آماری برازش شده با داده های مورد مطالعه به همراه پارامترهای تخمین زده شده برای هر مدل نشان داده شده است.



(الف)

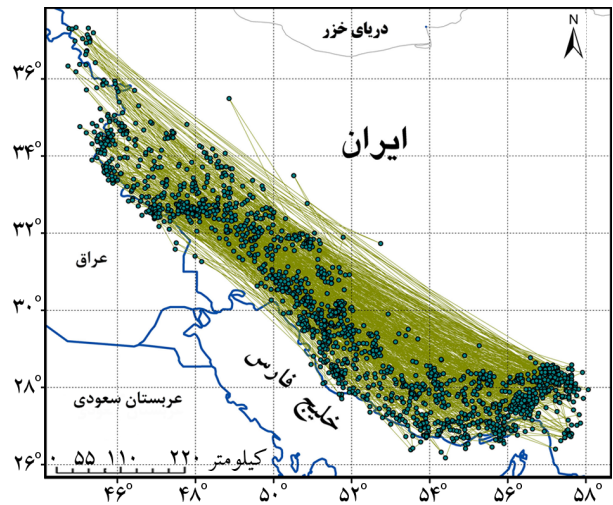


(ب)

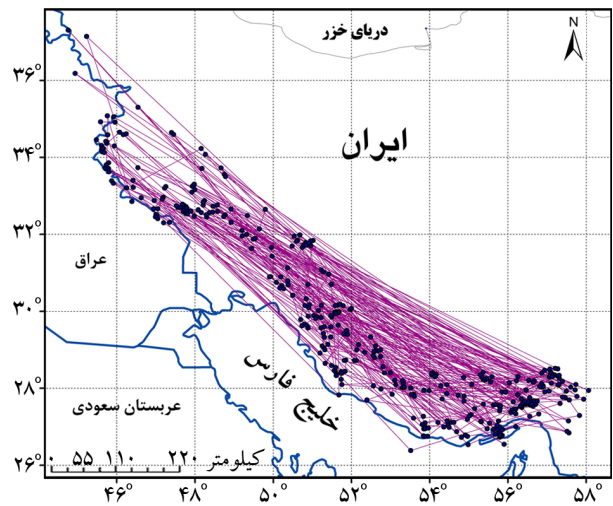


زمان بین رخداد (روز)
(پ)

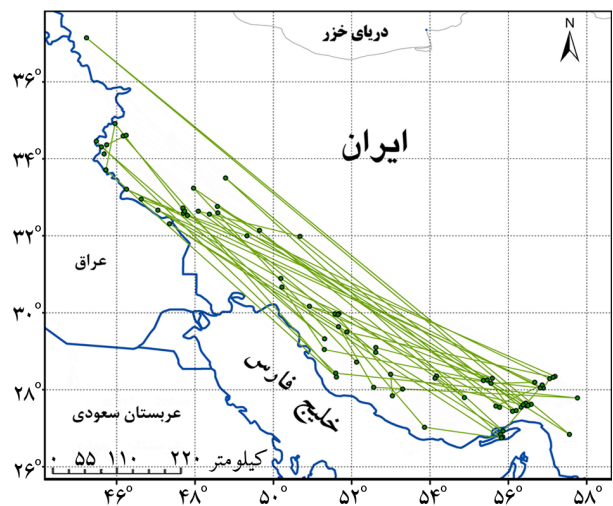
شکل (۵): مدل سازی آماری توزیع زمان بین رخداد زلزله های متوالی در ناحیه زاگرس برای (الف) زلزله های با $M \geq 4/5$ ، (ب) زلزله های با $M \geq 5/0$ و (پ) زلزله های با $M \geq 5/5$ ، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۴): الگوی مهاجرتی رخداد زلزله های متوالی در ناحیه زاگرس برای (الف) زلزله های با $M \geq 4/5$ ، (ب) زلزله های با $M \geq 5/0$ و (پ) زلزله های با $M \geq 5/5$ ، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.

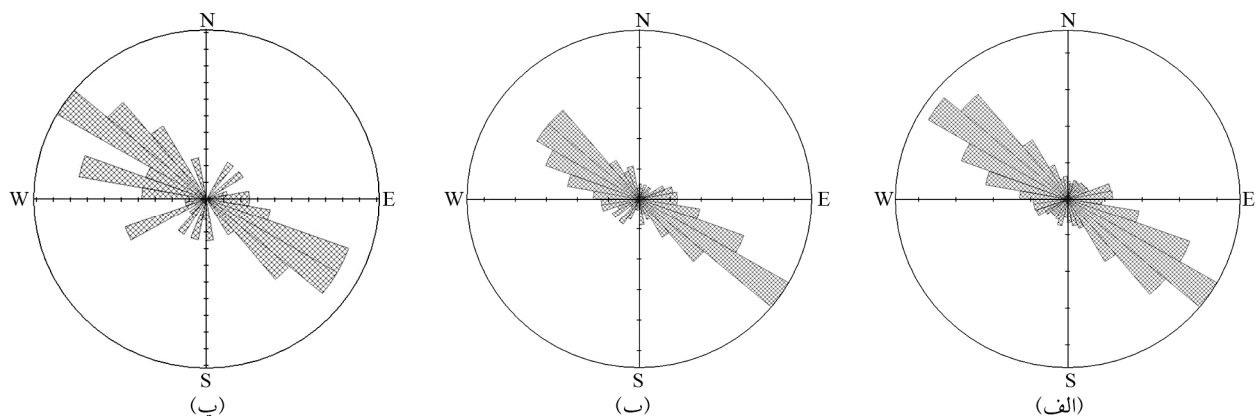
زاگرس، روند غالب شمال‌غربی - جنوب‌شرقی است که کاملاً با روند کلی این پهنه چین‌خورده - رانده و روند غالب گسل‌های اصلی فعال این ناحیه [۱۸] تطابق دارد. با توجه به این تطابق واضح می‌توان چنین گفت که زلزله‌های متوالی رخ داده در این ناحیه اکثراً بر روی قطعات مجزای زون‌های گسلی فعال ناحیه رخ می‌دهند. بر همین اساس به نظر می‌رسد که آزاد شدن انرژی لرزه‌ای ذخیره شده در پوسته این ناحیه به صورت متناوب و بر روی بخش‌های مختلفی از زون‌های گسلی طولی و فعال ناحیه، صورت می‌گیرد. به علاوه، به نظر می‌رسد این روند غالب مهاجرتی بر روی زلزله‌های با بزرگای بیشتر (شکل ۶-ب) تطابق بیشتری با روند گسل‌ها نشان می‌دهد. شاید این خود گویای این واقعیت باشد که زلزله‌های بزرگ‌تر بر روی قطعات گسلی طولی‌تر و مهم‌تری رخ می‌دهند که تبعیت بیشتری از رژیم زمین‌ساختی فعال منطقه نشان می‌دهند. این شواهد می‌تواند نشان‌دهنده الگوی قطعه‌بندی شده^{۱۳} گسل‌های فعال این ناحیه باشد. این یافته‌ها با نتایج ارائه شده توسط حسن‌لو و هاشمی [۱۹] در ارزیابی مهاجرت لرزه‌ای بر روی گسل‌های فعال کازرون و آناطولی همخوانی نشان می‌دهد.

آن‌گونه که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود روند غالب مهاجرت زلزله‌های متوالی با بزرگای حد پایین متفاوت $4/5$ ، $5/0$ و $5/5$ نزدیک به هم بوده و به ترتیب آزیموت این راستاهای غالب $N 125$ ، $N 130$ و $N 305$ است. این نتایج نشان می‌دهد که زلزله‌های متوالی در این ناحیه با روند مهاجرتی NW-SE نسبت به هم رخ می‌دهند.

بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که در بین مدل‌های چهارگانه مورد استفاده در مدل‌سازی آماری داده‌ها، مدل‌های ویبول و گاما، بسیار به هم شبیه بوده و بهترین همخوانی و تطابق را با توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله‌ها نشان می‌دهند. به علاوه مشاهده می‌شود که زلزله‌های با بزرگای حد پایین بیشتر (شکل ۵-پ)، همخوانی کمتری با این مدل‌ها داشته و این دو مدل می‌توانند تطابق بیشتری با زلزله‌های با بزرگای حد پایین کمتر (شکل ۵ الف و ب) نشان دهند. به وضوح دیده می‌شود، با افزایش بزرگای حد پایین زلزله‌ها، زمان بین رخدادی آنها از توزیع‌های آماری گاما و ویبول فاصله گرفته (شکل ۵-پ) و بیشتر با توزیع لاگک نرمال تطابق نشان می‌دهد. این یافته با نتایج طاهرنیا و همکاران [۸]، در بررسی زلزله‌های زاگرس مطابقت دارد و تأیید کننده وابستگی واضح مدل توزیع آماری بهینه در تطابق با داده‌های زمان بین رخدادی، به بزرگای حد پایین داده‌های مورد استفاده است. همچنین، نتایج این تحقیق به خوبی با یافته‌های سایر محققین [۳-۷] همخوانی نشان می‌دهد.

۴-۲- تحلیل راستای مهاجرتی زلزله‌های متوالی

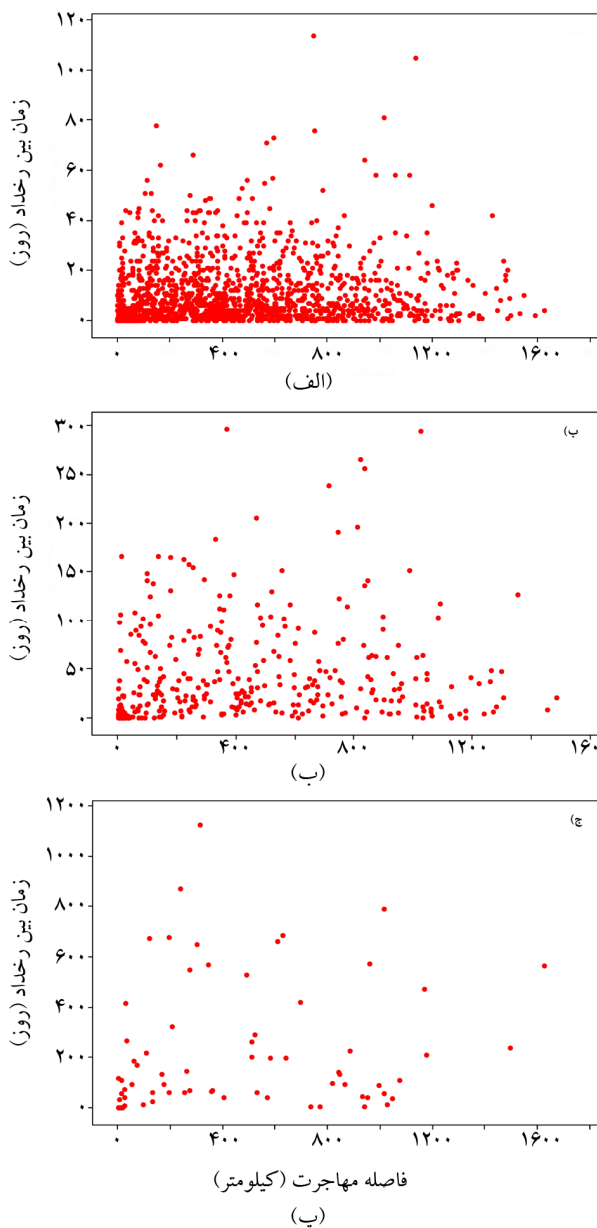
در این تحقیق، راستای مهاجرت زلزله‌های متوالی رخ داده در ناحیه مورد مطالعه با بزرگای حد پایین مختلف، تعیین شد و سپس نمودار گل سرخی این راستاها ترسیم شد که در شکل (۶) نشان داده شده است. نگاهی کلی به این نمودارها حکایت از آن دارد که روند مهاجرتی موقعیت مکانی زلزله‌های متوالی در ناحیه



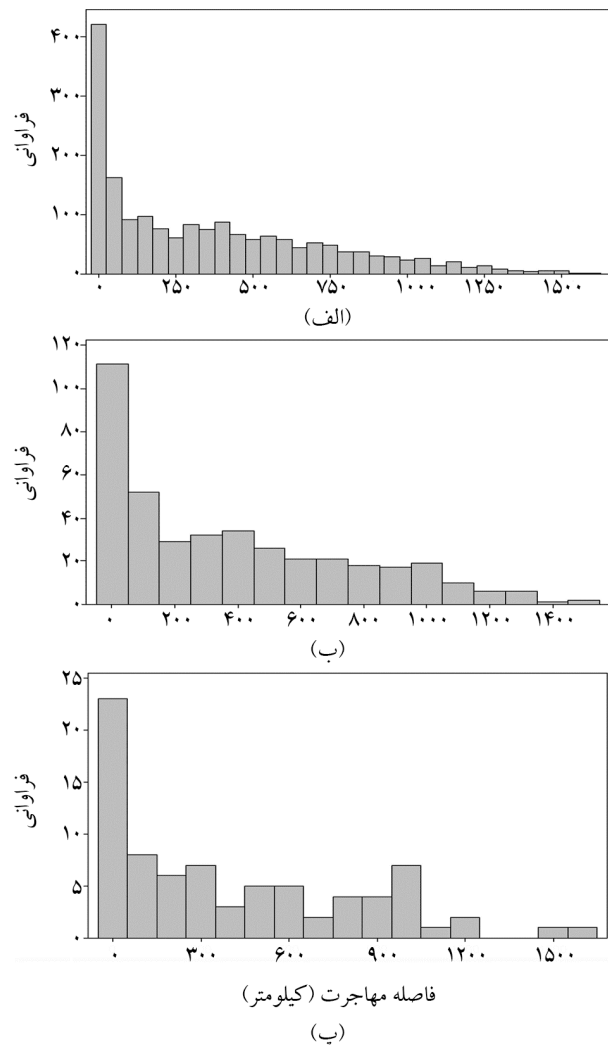
شکل (۶): نمودارهای گل سرخی نشان‌دهنده‌ی توزیع جهت‌ی راستای مهاجرت زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس برای (الف) زلزله‌های با $M \geq 4/5$ ، (ب) زلزله‌های با $M \geq 5/0$ و (پ) زلزله‌های با $M \geq 5/5$ ، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.

۳-۴- تحلیل فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی

به منظور بررسی و تحلیل فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس، فاصله افقی بین رومرکز رخداد‌های متوالی، بر حسب کیلومتر محاسبه گردید. در شکل (۷) نمودار توزیع فراوانی این مقادیر برای بزرگی‌های حد پایین ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵ نمایش داده شده است. روند کلی این توزیع فراوانی کاهش یافته و با توزیع فراوانی زمان بین رخدادی همخوانی خوبی نشان می‌دهد. به طور متوسط فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی رخ داده در این ناحیه با بزرگی حد پایین ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵، به ترتیب به مقدار ۳۶۷، ۳۸۲ و ۴۱۸ کیلومتر تعیین گردید. بر این اساس مشاهده



شکل (۸): نمودارهای توزیع زمان بین رخداد - فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس برای (الف) زلزله‌های با $M \geq 4/5$ ، (ب) زلزله‌های با $M \geq 5/0$ و (پ) زلزله‌های با $M \geq 5/5$ ، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.



شکل (۷): نمودارهای هیستوگرام فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس برای (الف) زلزله‌های با $M \geq 4/5$ ، (ب) زلزله‌های با $M \geq 5/0$ و (پ) زلزله‌های با $M \geq 5/5$ ، در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۷۶ تا پایان ماه فوریه ۲۰۱۹ میلادی.

نگاهی کلی به این نمودارها نشان می‌دهد که به‌ویژه برای زلزله‌های با بزرگای کمتر نمی‌توان ارتباط معناداری بین این دو متغیر یافت؛ اما برای زلزله‌های بزرگ‌تر (شکل ۸-پ) به نظر می‌رسد که بتوان ارتباطی مستقیم بین زمان بین رخدادی و فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی یافت. این خود بدان معناست که زلزله‌های با زمان بین رخدادی بیشتر انتظار می‌رود در فاصله دورتری از هم رخ دهند. این خود می‌تواند دلیلی بر رفتار مهاجرتی لرزه‌خیزی در این ناحیه محسوب شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، زمان بین رخداد، راستای مهاجرت و فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی رخ داده در ناحیه زاگرس با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵ محاسبه شده و مورد تحلیل و بررسی آماری قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- بررسی توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس نشان می‌دهد که در بین مدل‌های چهارگانه مورد استفاده در مدل‌سازی آماری داده‌ها، مدل‌های ویبول و گاما بهترین همخوانی و تطابق را با توزیع آماری زمان بین رخدادی زلزله‌ها نشان می‌دهد. به‌علاوه مشاهده می‌شود که زلزله‌های بزرگ‌تر همخوانی کمتری با این مدل‌ها دارند. محاسبات آماری انجام شده نشان می‌دهد که زمان بین رخدادی زلزله‌ها به‌طور متوسط برای بزرگی‌های حد پایین ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵، به ترتیب برابر با ۸/۶، ۳۸/۷ و ۱۹۸ روز است.

- نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد روند مهاجرتی موقعیت مکانی زلزله‌های متوالی در ناحیه زاگرس، روند غالب شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است که کاملاً با روند کلی این پهنه چین‌خورده- رانده و روند گسل‌های اصلی فعال این ناحیه تطابق دارد. بر همین اساس به نظر می‌رسد که آزاد شدن انرژی لرزه‌ای ذخیره شده در پوسته این ناحیه به‌صورت متناوب و بر روی بخش‌های مختلفی از زون‌های گسلی طویل و فعال ناحیه صورت می‌گیرد. به‌علاوه، به نظر می‌رسد این روند غالب مهاجرتی بر روی زلزله‌های با

بزرگای بیشتر تطابق بیشتری با روند گسل‌ها نشان می‌دهد. - توزیع داده‌های فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی به‌خوبی الگوی کاهشی مشابه با توزیع زمان بین رخدادی نشان می‌دهد. این فاصله مهاجرتی به‌طور متوسط برای بزرگی‌های حد پایین ۴/۵، ۵/۰ و ۵/۵، به ترتیب برابر با ۳۶۷، ۳۸۲ و ۴۱۸ کیلومتر است. به‌علاوه، بررسی ارتباط بین دو متغیر فاصله و زمان بین رخدادها، نشان می‌دهد که به‌ویژه برای زلزله‌های با بزرگای کمتر نمی‌توان ارتباط معناداری بین این دو متغیر یافت اما برای زلزله‌های بزرگ‌تر به نظر می‌رسد که بتوان ارتباطی مستقیم بین زمان بین رخدادی و فاصله مهاجرتی زلزله‌های متوالی یافت. این خود بدان معناست که زلزله‌های با زمان بین رخدادی بیشتر انتظار می‌رود در فاصله دورتری از هم رخ دهند که می‌تواند دلیلی بر رفتار مهاجرتی لرزه‌خیزی در این ناحیه باشد.

نتایج این تحقیق به‌عنوان گامی در راستای شناخت بهتر الگوی زمانی- مکانی رخداد زلزله‌ها در ناحیه زاگرس می‌تواند تا حد قابل قبولی به این سؤال پاسخ دهد که زلزله بعدی، پس از هر رخداد بزرگ، بر اساس مدل‌های آماری مورد استفاده، به‌طور تقریبی با چه فاصله مکانی، چه زمان انتظاری^{۱۴} و در چه روندی نسبت به رخداد قبلی، اتفاق می‌افتد. بر همین اساس می‌توان چنین گفت که زلزله‌های با بزرگای مساوی و بیش از ۵/۵ در این ناحیه، با میانگین فاصله مکانی حدود ۴۱۸ کیلومتر و با زمان انتظار میانگین ۱۹۸ روز و در راستای غالب N62W یا S62E نسبت به رخداد قبلی اتفاق می‌افتند. انتظار می‌رود در آینده، با امکان‌پذیر شدن دسترسی به داده‌های دقیق‌تر و به‌کارگیری روش‌های نوین دیگری چون مدل‌سازی شبکه‌های عصبی و روش هوش مصنوعی، بتوان به شناخت بهتر الگوی زمانی و مکانی رخداد زلزله‌ها دست یافت که بی‌شک گامی مهم و مؤثر برای نیل به پیش‌بینی زلزله در مقیاسی ناحیه‌ای محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه دامغان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

12. Talbi, A. and Yamazaki, F. (2010) A mixed model for earthquake inter-event times. *Journal of Seismology*, **14**, 289-307.
13. Molchan, G. (2005) Interevent time distribution in seismicity: a theoretical approach. *Pure and Applied Geophysics*, **162**, 135-1150.
14. Touati, S., Naylor, M., and Main, I.G. (2009) Origin and nonuniversality of the earthquake interevent time distribution. *Physical Review Letters*, **102**, 168501.
15. Berberian, M. (1981) 'Active faulting and tectonics of Iran.' In: Gupta, H.K., Delany, F.M. (Eds), *Zagros Hindukush-Himalaya Geodynamic Evolution*. Geodynamics Series, 3, American Geophysical union Washington, DC and Geological Society of America, Boulder, CO, 33-69.
16. Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, M., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chéry, J. (2004) Contemporary crustal deformation and plate kinematics in middle east constrained by GPS Measurements in Iran and Northern Oman. *Geophysical Journal International*, **157**, 381-398.
17. Falcon, N.L. (1969) 'Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros Range.' In: Kent, P.E., Satterthwaite, G.E. and Spencer, A.M. (Eds), *Time and Place in Orogeny*, 3, Geol. Soc. London, Spec. Publ., 9-22.
18. Hashemi, S.N. and Baizidi, C. (2018) 2-D Density and Directional Analysis of Fault Systems in the Zagros Region (Iran) on a Regional Scale. *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 2753-2768.
19. Hasanlou, A. and Hashemi, S.N. (2016) A comparison of fault interaction and seismicity migration in the Kazerun fault system (Iran) and the North Anatolian fault system (Turkey) based on the spatiotemporal analysis of earthquakes. *The Journal of the Earth and Space Physics*, **41**(4), 51-67.
1. Shearer, P.M. (2009) *Introduction to Seismology*. 2nd edn. Cambridge University Press, New York.
2. Keilis-Borok, V.I., Knopoff, L., Rotwain, I.M., and Allen, C.R. (1988) Intermediate-term prediction of occurrence times of strong earthquakes. *Nature*, **335**, 690-694.
3. Talbi, A., Bellalem, F., and Mobarki, M. (2019) Turkey and adjacent area seismicity forecasts from earthquake inter-event time mean ratio statistics. *Journal of Seismology*, **23**(3), 441-453.
4. Pasari, S. and Dikshit, O. (2015) Earthquake interevent time distribution in Kachchn, North-western India. *Earth, Planets and Space*, **67**, 129.
5. Godano, C. (2015) A new expression for the earthquake interevent time distribution. *Geophysical Journal International*, **202**, 219-223.
6. Hainzl, S., Scherbaum, F., and Beauval, C. (2006) Estimating background activity based on interevent-time distribution. *Bulletin of Seismological Society of America*, **96**(1), 313-320.
7. Talbi, A., Nanjo, K., Satake, K., Zhuang, J., and Hamdache, M. (2013) Inter-event times in a new alarm-based earthquake forecasting model. *Geophysical Journal International*, **194**(3), 1823-1835.
8. Tahernia, N., Khodabin, M., Mirzaei, N., and Eskandari-Ghadi, M. (2012) Statistical models of interoccurrence times of Iranian earthquakes on the basis of information criteria. *Journal of Earth System Science*, **121**(2), 463-474.
9. Rostami, S., Hashemi, S.N., and Ahmadi, M. (2017) Statistical analysis of the temporal pattern of seismicity in the Zagros region. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, **4**(2), 1-14 (in Persian).
10. Pasari, S. and Dikshit, O. (2018) Stochastic earthquake interevent time modeling from exponentiated Weibull distributions. *Natural Hazards*, **90**(2), 823-842.
11. Talbi, A. and Yamazaki, F. (2009) Sensitivity analysis of the parameters of earthquake recurrence time power law scaling. *Journal of Seismology*, **13**, 53-72.

واژه‌نامه

- Successive Earthquakes ۱- زلزله‌های متوالی
- Inter-Event Time ۲- زمان بین رخداد

Gamma Distribution	۳- توزیع آماری گاما
Weibull Distribution	۴- توزیع آماری ویبول
Lithosphere	۵- سنگ کره
Segmentation	۶- قطعه‌بندی
Stochastic Point Process	۷- فرایند نقطه‌ای تصادفی
Exponential Distribution	۸- توزیع نمایی
Precursor	۹- پیش‌نشانگر
Stationary	۱۰- ایستا
Lognormal Distribution	۱۱- توزیع لاگ نرمال
Lower Magnitude Thresholds	۱۲- بزرگی‌های حد پایین
Segmented	۱۳- قطعه‌بندی شده
Waiting Time	۱۴- زمان انتظار

Statistical Modeling of the Migrating Pattern of the Occurrence of Successive Earthquakes in the Zagros Region

Seyed Naser Hashemi

Assistant Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran, email: hashemi@du.ac.ir

1. Introduction

Most of the seismic energy (or tectonic loading) accumulated in lithosphere of active regions is released through the occurrence of large earthquakes that usually show complex spatio-temporal patterns. Hence, the study of the spatial and temporal pattern of these occurrences is very important for revealing the seismotectonic nature of these regions. Over the past decades, the statistics of the waiting times between consecutive earthquakes (so-called inter-event times) have become the focus of research. Statistical analysis of inter-event times of earthquakes allows the derivation of useful information that can allow the development of earthquake forecasting strategies, and inter-event time statistics for moderate to small events may be used to extrapolate inter-event time behaviour at larger scales. Assuming that the release of seismic energy (by occurring earthquakes) is stationary in the whole region of Zagros, in this research, the spatio-temporal relationships of the occurrences of large earthquakes that occurred in this region have been studied.

2. Methodology

In this study, the migration pattern of successive earthquakes in the Zagros region during the period 1976-2019 has been studied for earthquakes with magnitude 4.5 and greater. In order to carry out this work, the earthquake data of the examined region with $M \geq 4.5$ (1976-2019) have been obtained from the USGS catalog. Then, the inter-event time, migration distance, and migration trend of successive earthquakes with different lower magnitude thresholds of 4.5, 0.5 and 5.5 were calculated and the statistical distribution of these data was analyzed and modeled.

3. Results and Discussion

Statistical analysis of the inter-event times between consecutive earthquakes in the Zagros region shows that among the different models used in statistical modeling of data, Weibull and Gamma models show the best agreement with the statistical distribution of inter-event time data. In addition, it is observed that larger earthquakes are less compatible with these models. Furthermore, migration distance data from successive earthquakes also shows a decreasing pattern, similar to the inter-event time distribution data. In addition, the study of the relationship between the two variables of migration distance and time interval between events shows that it is not possible to find a significant relationship between these two variables especially for earthquakes of smaller magnitude, but for larger earthquakes, it seems that a positive correlation between these two variables exists. This finding indicates that earthquakes with more inter-event times are expected to occur farther apart from each other, which could be a reason for seismicity migration behavior of earthquakes in this region. Also, the directional pattern of earthquakes migration data shows a pattern consistent with the general trend of active faults in the Zagros region, which confirms the idea that the activation of discrete segments of fault systems in this region plays a key role in the temporal and temporal pattern of seismicity. Based on the results of this study, it is expected that earthquakes with magnitude 5.5 and greater, tend to occur with an average migration distance of about 418 km and an average waiting time of 198 days, and in the dominant directional azimuth of N62W or S62E, compared to their previous events.

4. Conclusions

The results of this study can be considered as an effective step to better understanding the temporal-spatial pattern of seismicity in the Zagros region and also as an attempt to achieve earthquake prediction in a regional scale.

It is expected that in the future, with the possibility of access to more accurate data and the use of other new methods such as neural network modeling and artificial intelligence, it will be possible to better understand the temporal and spatial pattern of earthquakes, which undoubtedly is an important and effective step to achieve earthquake prediction on a regional scale.

Keywords: Inter-event Time Distribution, Statistical Distribution of Earthquakes, Earthquake Directional Migration Pattern, Seismicity, Seismotectonics, Zagros.