تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۱۹
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۳

تحلیل آماری الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس

سمیه رستمی توسه چال
دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان
سید ناصر هاشمی (نویسنده مسئول)
استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، hashemi@du.ac.ir
مسیّب احمدی
استادیار دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه دامغان

چکیده
در این تحقیق، الگوی زمانی[1] رخداد زلزله‌ها در ناحیه‌ی زاگرس در یک بازه‌ی زمانی بیش از ۱۱ سال (از آغاز سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی) به کمک روش‌های آماری مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، تعیّت داده‌های لرزه‌ای از توزیع پواسون[2] ارزیابی شده و همچنین تحلیل سری‌های زمانی[3] این داده‌ها انجام شده است. به این منظور، تصادفی بودن توزیع رخداد زلزله‌ها در زمان، با برازش مدل توزیع پواسون به داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس از مدل‌سازی سری‌های زمانی برای یافتن الگوی مولّد داده‌ها استفاده شد. نتیجه‌ی کلی حاصل از این تحلیل آماری نشان می‌دهد الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها در این ناحیه از الگوی تصادفی با توزیع پواسون تبعیّت نمی‌کند. درعین‌حال، در این تحلیل مشخص شد که الگوی زمانی رخداد زلزله‌های با بزرگی بیشتر، به توزیع تصادفی پواسون نزدیک‌تر است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل سری‌های زمانی بر روی داده‌ها نشان می‌دهد الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها بر اساس متغیّرهای بزرگی و عمق کانونی، به‌ترتیب با مدل ARMA(1,1) و مدل‌های ARMA(0,1) و ARMA(0,2) سری‌های زمانی مطابقت نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: الگوی زمانی، لرزه‌خیزی، توزیع پواسون، ناحیه زاگرس، تحلیل سری‌های زمانی، لرزه‌زمین‌ساخت[4].

۱- مقدمه

استفاده از روش‌های آماری در تحلیل الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها در نواحی لرزه‌خیز دنیا، گامی مؤثر در شناخت رفتار لرزه‌خیزی این نواحی و تلاشی برای یافتن نظم حاکم بر تغییرات زمانی لرزه‌خیزی در راستای نیل به پیش‌بینی زلزله به‌عنوان یک هدف بزرگ محسوب می‌شود. شناخت الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها به‌عنوان گامی در راستای پیش‌بینی زلزله، با توجه به اهمیت پیش‌بینی در جهت کاهش خطرات و خسارات ناشی از زلزله، موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه‌های اخیر بوده است. پدیده‌ی لرزه‌خیزی ماهیتی مکانی – زمانی دارد، به این معنا که بررسی دقیق ویژگی‌های لرزه‌خیزی یک ناحیه مستلزم مطالعه‌ی هم‌زمان این فعالیت در مکان و زمان است. در اکثر موارد به دلیل پیچیدگی موضوع و در دسترس نبودن داده‌های دقیق و کافی، تغییرات لرزه‌خیزی صرفاً به‌صورت مکانی و یا زمانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحقیق، تنها تغییرات زمانی فعالیت لرزه‌ای در ناحیه‌ی زاگرس مورد توجه و بررسی قرار گرفته است و با فرض یکنواختی این فعالیت در کل ناحیه، از بررسی تغییرات مکانی این فعالیت صرف‌نظر شده است.

با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده، مطالعه‌ی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در نواحی لرزه‌خیز دنیا با استفاده از روش‌های آماری موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است. در آناتولی شمالی، احتمال وقوع زلزله با استفاده از مدل آماری نیمه مارکوف برآورد شده است [۱]. در این مدل فرض بر این است که زلزله‌های پی‌درپی در ناپیوستگی‌های ساختاری مشابه، رویدادهایی مستقل نیستند و وابسته به فاصله‌ی زمانی سپری شده از رخدادهای قبلی می‌باشند. در اسپانیا، داده‌های زمانی رخداد زلزله‌ها بررسی شده و آزمون‌های آماری ناپارامتری بر روی این

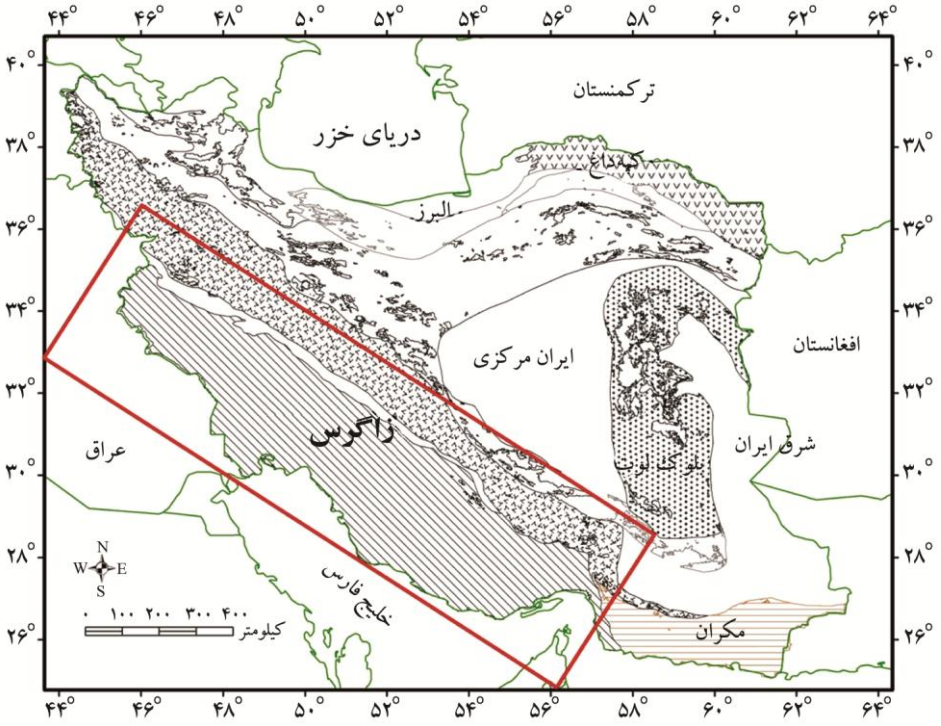
داده‌ها اجرا شده و نتایج حاصله مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق از تکنیک‌های خوشه‌بندی برای به‌دست آوردن الگوهایی که رفتار داده‌های زمانی لرزه‌ای را مدل‌سازی می‌کنند استفاده شده است که می‌تواند به پیش‌بینی زلزله‌های متوسط تا بزرگ کمک کند [۲]. در تایوان، ارتباط بین توزیع پواسون و توزیع زمانی ۵۵۰۰۰ زلزله در سرتاسر تایوان در یک بازه‌ی زمانی ۱۱۰ ساله، برای به‌دست آوردن یک دوره‌ی بازگشت مناسب برای پیش‌بینی زلزله‌های مخرب، مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص شده است الگوی رخداد زلزله‌ها در تایوان در بازه‌ی زمانی ۱۱۰ ساله از توزیع پواسون تبعیت نمی‌کند [۳]. در ژاپن توزیع پواسون برای فعالیت‌های لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای مختلف، برای کاربرد توزیع پواسون در فعالیت‌های لرزه‌ای و تأثیر این پارامترها روی احتمالات لرزه‌ای مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است [۴]. وانگ و چین چانگ [۵] نیز مطالعه‌ای در زمینه‌ی ارائه‌ی شواهدی در حمایت از تبعیّت تابع احتمال خطر لرزه‌ای از توزیع پواسون انجام داده‌اند و در آن از روش‌های جدید شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند.

در ایران نیز زمانی و آق‌آتابای [۶] به کمک تحلیل چند فرکتالی به مطالعه‌ی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در نواحی البرز و زاگرس پرداخته‌اند. در جنوب ایران الگوی رویداد زلزله توسط یک فرآیند نیمه مارکوف مدل‌سازی شده و به‌منظور ارائه‌ی نتایجی جهت پیش‌بینی، احتمال وقوع زلزله‌های بعدی با بزرگی‌های متفاوت در بازه‌های زمانی آینده، با دانستن اطلاعات آخرین زمین‌لرزه، محاسبه شده است [۷]. در پژوهش دیگری داده‌های لرزه‌ای یک ایستگاه لرزه‌نگاری جمع‌آوری شده و مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند. برای این منظور از یک روش جدید سری زمانی استفاده شده است و هدف در این مطالعه این بوده که مشخص شود آیا در داده‌های تصادفی لرزه‌ای نظمی وجود دارد یا خیر. سپس با فیلتر نمودن داده‌ها، تغییرات دوره‌ای حذف شده و یک دوره‌ی بازگشت مناسب جهت کاربرد در پیش‌بینی داده‌ها به‌دست آمده است [۸]. علاوه بر موارد اشاره شده، بررسی الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها، به کمک روش‌های مختلف آماری، موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه‌های اخیر بوده است [۹-۱۲].

ناحیه‌ی زاگرس به دلیل جایگاه زمین‌ساختی خود به‌عنوان یک زون برخوردی قاره- قاره، از نظر لرزه‌خیزی بسیار فعال است؛ بنابراین ارزیابی و بررسی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در این ناحیه اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق الگوی زمانی لرزه‌خیزی برای زلزله‌های رخ داده در این ناحیه، برای یک بازه‌ی زمانی بیش از ۱۱ سال (از آغاز سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی) مورد بررسی قرار گرفته است تا مشخص شود آیا این الگو از توزیع پواسون پیروی می‌کند یا خیر و همچنین اینکه آیا الگوی یادشده، وابسته به بزرگی زلزله‌ها است یا خیر. به‌علاوه، این داده‌های لرزه‌ای توسط مدل‌سازی سری‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی زاگرس

ناحیه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، پهنه‌ی لرزه‌خیز زاگرس است که از فعال‌ترین نواحی لرزه‌خیز دنیا محسوب شده و سالانه زلزله‌های مخرب زیادی در این پهنه رخ می‌دهد (شکل ۱). کمربند چین‌خورده-رانده‌ی زاگرس با امتداد NW-SE در حاشیه‌ی شمال شرق پوسته‌ی قاره‌ای عربستان، بر روی پی‌سنگ دگرگون پرکامبرین قرار دارد که حاصل همگرایی مایل بین صفحات عربی و اوراسیا با روند N-S و با سرعت حدود ۳۵- ۲۵ میلی‌متر در سال است [۱۳]. میزان همگرایی از شمال‌غرب به جنوب‌شرق بیشتر می‌شود [۱۴]، به همین علت در قسمت شمال‌غرب باریک‌تر بوده و دارای وسعت حدود ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد، درصورتی‌که به سمت جنوب‌شرق وسیع‌تر شده و این پهنا به حدود ۴۰۰-۳۵۰ کیلومتر می‌رسد [۱۳]. طول این کمربند در حدود ۱۸۰۰ کیلومتر بوده و از کوه‌های تاروس در ۳۰ کیلومتری گسل شرق آناتولی در شمال‌شرق ترکیه، شروع شده و از عراق و جنوب‌غربی ایران و تنگه‌ی هرمز گذشته و به خط شمالی- جنوبی عمان می‌رسد که آن را



شکل (۱): نقشه‌ی ساختاری و زمین‌ساختی ایران که در آن پهنه‌های مختلف ساختاری ایران نشان داده شده و موقعیت تقریبی ناحیه‌ی زاگرس، به‌عنوان ناحیه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، نشان داده شده است.

از ناحیه‌ی مکران جدا می‌کند [۱۵]. در شکل (۱) نقشه‌ی ساختاری و زمین‌ساختی ایران ارائه شده است که در آن پهنه‌های مختلف ساختاری ایران و همچنین موقعیت تقریبی ناحیه‌ی زاگرس، به‌عنوان ناحیه‌ی مورد مطالعه، نشان داده شده‌است.

از دیدگاه بیشتر زلزله‌شناسان، سرتاسر زاگرس به‌عنوان یک کمربند کوهستانی لرزه‌زا در نظر گرفته می‌شود، اما باید توجه داشت که این کمربند حاصل دگرشکلی یک حوضه‌ی حاشیه‌ای غیرفعال قدیمی و وسیع بر روی بخش شمال‌خاوری صفحه‌ی عربی است. اگرچه زمین‌لرزه‌های نیمه‌عمیق (بین ۷۰ تا ۳۰۰ کیلومتر) در مناطق برخورد قاره‌ای می‌توانند بین زمین‌لرزه‌های کم‌عمق (عمق کانونی کمتر از ۷۰ کیلومتر) به‌صورت پراکنده رخ دهند، اما به نظر می‌رسد لرزه‌خیزی در زاگرس از نوع کم‌عمق باشد. مطالعه‌ی تاریخچه‌ی لرزه‌خیزی گستره‌ی رسوبی- ساختاری زاگرس، حکایت از رویداد زمین‌لرزه‌های ویرانگری دارد که بارها باعث ویرانی و تخریب شهرها و روستاهای این گستره شده است. وجود گسل‌های بنیادی جنبا و بزرگ در این پهنه و بسیاری از گسل‌های فعال پوشیده‌ی دیگر، باعث لرزه‌خیزی بالای این پهنه شده‌اند و در طول تاریخ، ضمن جنبش مجدد، خود عامل زمین‌لرزه‌های خسارت‌باری در بخش‌های مختلف این گستره بوده‌اند به‌گونه‌ای که اکثر شهرهای واقع در این ناحیه، بارها در طی زمین‌لرزه‌های تاریخی و سده‌ی اخیر لرزیده و خسارت دیده‌اند. مطالعه‌ی تاریخچه‌ی لرزه‌خیزی زاگرس، نشان‌دهنده‌ی تمرکز بالای رومرکز زمین‌لرزه‌های روی‌داده در این پهنه است به‌گونه‌ای که در مقایسه با سایر نواحی ایران دارای بیشترین فراوانی بوده و در تمام سطح این گستره پراکنده می‌باشند.

در این تحقیق با توجه به خطر لرزه‌خیزی بالا در ناحیه‌ی زاگرس و در دسترس بودن داده‌های لرزه‌ای نسبتاً کامل برای این ناحیه در سالیان اخیر، الگوی زمانی لرزه‌خیزی این ناحیه به‌منظور شناخت بیشتر ویژگی‌های لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساختی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

ساده‌ترین داده‌های مبتنی بر زمان، داده‌هایی هستند که به‌طور متوالی در زمان تولید می‌شوند. در زمین‌شناسی این داده‌ها برای تجزیه‌وتحلیل رخدادهای تاریخی مانند زلزله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و به‌عنوان نقاطی در زمان در نظر گرفته می‌شوند. پایان ثبت زمان رخدادها معمولاً مشخص است و بشر علاقه‌ی زیادی به پیش‌بینی آینده‌ی رخداد زلزله‌ها و یافتن الگوی موجود در رخداد آنها دارد و این علاقه‌ی بشری ممکن است آستانه‌ی فعالیت لرزه‌ای را تعیین کند. حوادث و رخدادهایی که زندگی بشر را تهدید می‌کنند ممکن است به‌صورت تصادفی در طول زمان رخ دهند که در این صورت پیش‌بینی بر مبنای الگوی گذشته‌ی رخدادها بی‌فایده است، درحالی‌که رخدادهای غیر تصادفی ممکن است الگوهای منظمی داشته باشند که به پیش‌بینی کمک کنند. تصادفی بودن یک رخداد، یعنی وقوع آن رخداد روی احتمال وقوع رخدادهای دیگر تأثیر ندارد و این در شرایط زمین‌شناسی بعید به نظر می‌رسد. به‌عنوان‌مثال یک زلزله ممکن است احتمال وقوع زلزله‌های بعدی را از طریق آزاد شدن تنش تغییر دهد یا باعث بی‌ثباتی در رخداد آنها شود [۱۶].

امروزه پیش‌بینی زلزله نه‌تنها یک موضوع جذاب در زلزله‌شناسی است، بلکه به‌عنوان یک هدف مهم مطرح می‌باشد. در این راستا یکی از تکنیک‌ها، استفاده از روش‌های آماری است. در این مطالعه روش‌های برازش مدل احتمال توزیع پواسون و سری‌های زمانی جهت تعیین الگوی احتمالی رخداد زمین‌لرزه‌ها و بررسی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس مورد استفاده قرار گرفته است و هر یک از این روش‌ها به‌طور جداگانه تشریح شده است. منظور از الگوی زمانی لرزه‌خیزی، رفتار داده‌های لرزه‌ای در یک بازه‌ی زمانی مشخص است که دارای چه الگو یا روندی هستند و اینکه آیا نظمی در رخداد آنها وجود دارد یا خیر.

زلزله از نظر محل وقوع، زمان وقوع و بزرگی یک نوع فرآیند نقطه‌ای محسوب می‌شود. به‌عبارت‌دیگر منشأ زمین‌لرزه و آزاد شدن انرژی لرزه‌ای از محل کانون صورت می‌گیرد و کانون زلزله به‌صورت یک نقطه در نظر گرفته می‌شود که انرژی لرزه‌ای ابتدا از آنجا به‌صورت نقطه‌ای آزاد شده و سپس به اطراف گسترش می‌یابد. فرآیندهای نقطه‌ای، فرآیندهای تصادفی هستند که در مکان، زمان و یا هر دو رخ می‌دهند. این فرآیندها ممکن است الگوهای مختلفی مانند الگوی منظم، الگوی تصادفی و الگوی خوشه‌ای داشته باشند [۱۷]. اگر زلزله به‌عنوان یک فرآیند نقطه‌ای دارای الگوی تصادفی باشد، می‌توان تبعیت الگوی لرزه‌خیزی از توزیع پواسون را مورد ارزیابی قرار داد که این کار با محاسبه‌ی شاخص‌های آماری و استفاده از آزمون‌های آماری مناسب امکان‌پذیر می‌باشد.

در آمار و احتمال، توزیع پواسون یک توزیع احتمالی گسسته است. تعداد رخدادها یا پیشامدهایی که در یک بازه‌ی زمانی خاص یا در یک محدوده‌ی مکانی خاص رخ می‌دهند، معمولاً از الگوی توزیع پواسون پیروی می‌کنند. در بازه‌های زمانی که هدف این مطالعه نیز می‌باشد، احتمال رخداد پیشامدها، تنها به طول بازه‌ی زمانی بستگی دارد و به نقطه‌ی آغازین بازه بستگی ندارد. همچنین تعداد پیشامدها در بازه‌های زمانی که تداخلی با یکدیگر ندارند، مستقل از یکدیگر هستند. به‌طورکلی اگر متغیر تصادفی x دارای توزیع پواسون باشد به‌گونه‌ای که شمارش‌ها در بازه‌ی زمانی یکسان انجام شود، آنگاه تابع احتمال آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$f_{(x)} = P_{(N_{(t)}=x)} = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، x=0,1,2,… ، e پایه‌ی لگاریتم طبیعی و برابر با ۲/۷۱۸۲۸، و λ مقدار میانگین متغیر x می‌باشد [۱۸-۱۹].

از سوی دیگر، تحلیل سری‌های زمانی معمولاً به داده‌هایی مربوط می‌شود که مستقل نبوده و به‌طور متوالی به هم وابسته‌اند و همین وابستگی بین مشاهدات متوالی است که مورد توجه قرار می‌گیرد و بیشترین کاربرد آن در پیش‌بینی خواهد بود. وابستگی مشاهدات مجاور از خصوصیات ذاتی و اصلی سری‌های زمانی

است، بنابراین پیدا کردن این وابستگی و توصیف آن بسیار حائز اهمیت است. سری‌های زمانی یکی از شاخه‌های آمار و احتمال است که در سایر رشته‌های علوم از جمله ژئوفیزیک، اقتصاد، مهندسی ارتباطات، هواشناسی و ... کاربرد فراوانی دارد. دامنه‌ی کاربردهای سری‌های زمانی روز به روز گسترده‌تر می‌شود و نیاز دانش‌پژوهان در این زمینه افزون‌تر می‌گردد. سری‌های زمانی برای درک، توصیف، کنترل و پیش‌بینی بهتر فرآیندهای متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک سری زمانی مجموعه‌ای از مشاهدات است که بر حسب زمان (یا هر کمیت دیگر) مرتب شده باشند و معمولاً آن را به‌صورت $x_{t1},x_{t2},\ldots,x_{tn}$ نشان می‌دهند. به‌عبارت‌دیگر سری زمانی، دنباله‌ای از n مشاهده از یک فرآیند در فواصل زمانی یکسان است که این فواصل ممکن است بر حسب سال، ماه، روز و ... باشد.

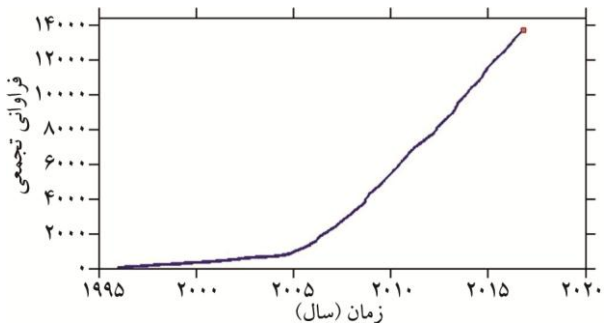
در تجزیه‌وتحلیل یک سری زمانی ممکن است چندین هدف وجود داشته باشد. این اهداف را می‌توان به‌صورت توصیف، تشریح، پیش‌بینی و کنترل دسته‌بندی نمود. هرچند توصیف رفتار یک سری زمانی از لحاظ تغییرات موضعی و دراز مدت در آن، یا مطالعه‌ی وابستگی‌های موجود بین عناصر سری، از بررسی‌های متداولی است که روی سری‌های زمانی انجام می‌شود، اما می‌توان گفت مهم‌ترین هدف از تجزیه‌وتحلیل سری‌های زمانی پیش‌بینی مقادیر آینده است. سری‌های زمانی تحت قالب‌های مختلفی مدل‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها به دو دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌ی اول مدل‌های ایستا[5] و دسته‌ی دوم مدل‌های غیرایستا[6] می‌باشند. مدل‌های ایستا، مدل‌هایی هستند که در آنها میانگین و پراکندگی در طول زمان ثابت هستند. مفهوم اساسی ایستایی این است که قوانین حاکم بر فرآیند، با زمان تغییر نمی‌کند. در مدل‌های غیرایستا، داده‌های فعلی بر اساس داده‌های گذشته به‌علاوه‌ی یک عامل تصادفی خطا تعریف می‌شوند. بسیاری از سری‌ها رفتار غیرایستا از خود نشان می‌دهند و این بدان معناست که داده‌ها حول میانگین ثابتی نوسان نمی‌کنند.

در فرآیندهای ایستا به‌طورکلی سه مدل با مرتبه‌های مختلف می‌تواند بر داده‌ها برازش داده شوند که شامل مدل‌های AR (اتورگرسیو[7])، MA (میانگین‌متحرک[8]) و ARMA (اتورگرسیو میانگین‌متحرک) می‌باشند. اگر فرآیند غیر ایستا باشد معمولاً مدل ARIMA (اتورگرسیو تلفیق‌شده‌ی میانگین‌متحرک) بر داده‌ها برازش داده می‌شود. بررسی درستی الگو، به تجزیه‌وتحلیل کیفیت الگویی که تشخیص داده می‌شود، بستگی دارد. در این مرحله باید مشخص شود که برازش الگو به داده‌ها تا چه اندازه مناسب است و آیا فرض‌های مربوط به الگو به‌طور قابل قبولی صادق هستند یا خیر. اگر عدم تطابقی در الگو مشاهده نشود، در این صورت فرض می‌شود، الگو کامل است و با استفاده از آن می‌توان مقادیر آینده‌ی سری را پیش‌بینی کرد و در غیر این صورت، بر مبنای عدم تطابقی که در الگو پیدا شده است الگوی دیگری انتخاب می‌شود، یعنی باز هم از مرحله‌ی شناسایی الگو شروع می‌شود و این سه مرحله آن‌قدر تکرار می‌شوند تا یک الگوی مناسب به‌دست آید. مبانی تئوری و جزئیات روش‌های تحلیل سری‌های زمانی و صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی‌های سری‌های زمانی در اکثر کتاب‌ها و منابع مرجع آماری به‌تفصیل شرح داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مراجع [۲۰- ۲۲] اشاره نمود.

۴- تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، شامل داده‌های لرزه‌ای دستگاهی ناحیه‌ی زاگرس می‌باشد که از پایگاه‌های IIEES و USGS دریافت شده است. ابتدا داده‌های لرزه‌ای ناحیه‌ی مورد مطالعه از آغاز سال ۱۹۹۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی از پایگاه‌های داده‌ای دریافت شد. لیکن با بررسی نمودار فراوانی تجمعی زلزله‌ها به زمان (شکل ۲)، مشخص شد که کل بازه‌ی داده‌ها همگنی زمانی لازم را ندارند. لذا برای رفع این مشکل، داده‌های قبل از سال ۲۰۰۵ میلادی (یعنی بخش اولیه‌ی داده‌ها در نمودار ارائه شده در شکل ۲) از کاتالوگ داده‌ای

حذف گردید. آن‌گونه که از نمودار ارائه شده در شکل (۲) مشخص است، داده‌های لرزه‌ای بعد از سال ۲۰۰۵ همگن بوده و نمودار توزیع، در این بخش به‌خوبی الگوی خطی را نشان می‌دهد.

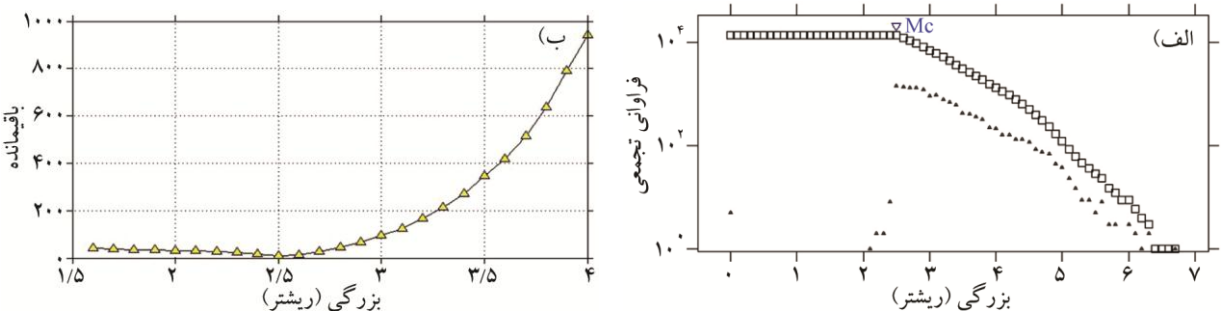


شکل (۲): نمودار تغییرات فراوانی تجمعی زلزله‌ها به زمان برای داده‌های لرزه‌ای ناحیه‌ی زاگرس در بازه‌ی زمانی آغاز سال ۱۹۹۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی. با توجه به نمودار، داده‌های لرزه‌ای پس از سال ۲۰۰۵ از همگنی زمانی لازم برخوردارند.

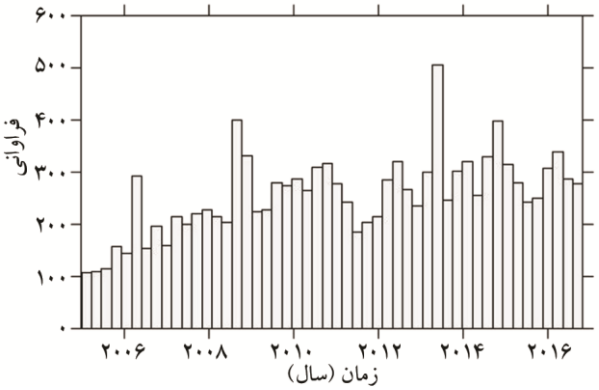
در ادامه، به‌منظور دست‌یابی به یک کاتالوگ داده‌ای همگن، لازم است که بزرگای کامل بودن داده‌ها[9] مشخص گردیده و سپس زلزله‌های با بزرگی کمتر از این حد بزرگی، از کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای حذف شوند. در شکل (۳) نمودارهای تغییرات فراوانی تجمعی زلزله‌ها به بزرگی (شکل ۳ الف) و تغییرات مقادیر باقیمانده به بزرگی زلزله‌ها (شکل ۳ ب) نمایش داده شده است. با توجه به این نمودارها و با در نظر گرفتن ارتباط خطی بین فراوانی تجمعی زلزله‌ها و بزرگی، و بر اساس معیار بیشینه‌ی شباهت، بزرگی ۲/۵ ریشتر به‌عنوان بزرگای کامل بودن داده‌ها (Mc) انتخاب گردید و زلزله‌های با بزرگی کمتر از ۲/۵ ریشتر از کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای حذف شدند.

از سوی دیگر، با توجه به ضرورت فرض مستقل بودن زلزله‌ها جهت مطالعه‌ی روابط زمانی آنها، لازم است رخدادهای غیرمستقل از کاتالوگ داده‌های مورد بررسی حذف شوند یا به عبارتی، داده‌ها بدون خوشه‌بندی[10] شوند. به این منظور، با استفاده از نرم‌افزار Zmap و با انتخاب روش ریزنبرگ[11]، داده‌ها بدون خوشه‌بندی شدند که بر این اساس تعداد ۳۰۸۲ رخداد از مجموع ۱۶۳۱۸ داده، جداسازی شد و کاتالوگ جداسازی شده‌ی نهایی، با تعداد رخداد ۱۳۲۳۶ زلزله، جهت تحلیل زمانی مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۴) نمودار توزیع فراوانی زلزله‌های بدون خوشه‌بندی و با بزرگی بیش از ۲/۵ ریشتر نسبت به زمان، نمایش داده شده‌است.

در این تحقیق، هدف بررسی الگوی زمانی رخداد این زلزله‌ها در دو قالب همخوانی توزیع زمانی زلزله‌ها با توزیع پواسون و تشخیص الگوی مولد داده‌ها بر اساس مدل‌سازی سری‌های زمانی می‌باشد. با توجه به همگن‌سازی زمانی داده‌ها و حذف داده‌های غیرمستقل، کاتالوگ داده‌ای به‌دست‌آمده می‌تواند به‌طور قابل قبولی در بررسی الگوی زمانی رخدادها مورد تحلیل قرار گیرد.



شکل (۳): نمودارهای الف) تغییرات فراوانی تجمعی و ب) تغییرات مقادیر باقیمانده به بزرگی زلزله‌ها برای داده‌های لرزه‌ای ناحیه‌ی زاگرس در بازه‌ی زمانی ابتدای سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی.



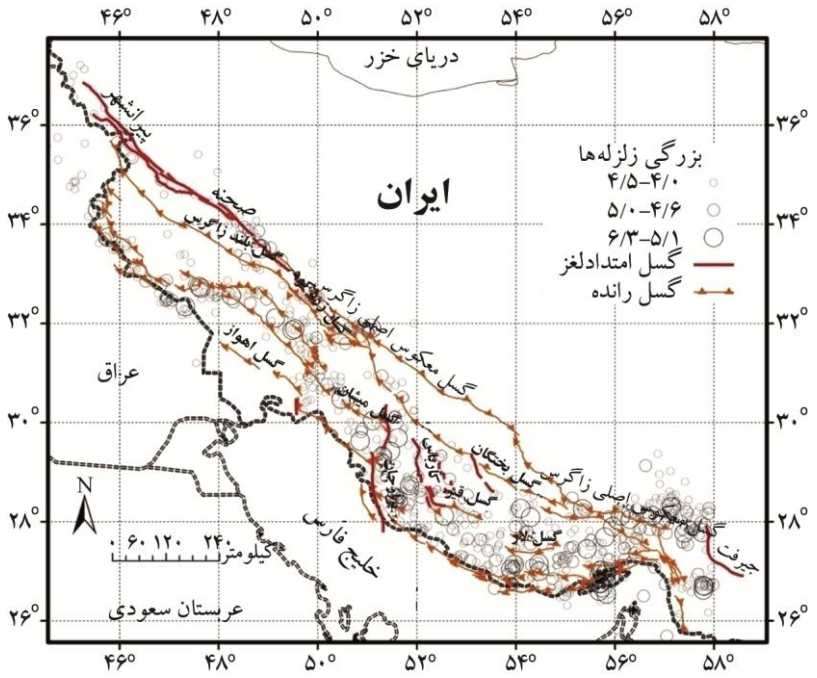
شکل (۴): نمودار توزیع فراوانی زلزله‌های بدون خوشه‌بندی و با بزرگی بیش از ۲/۵ ریشتر نسبت به زمان، در بازه‌ی زمانی ابتدای سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی.

در شکل (۵) نقشه‌ی توزیع رومرکز زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰ ریشتر رخ داده در ناحیه‌ی زاگرس در بازه‌ی زمانی ابتدای سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی به همراه گسل‌های اصلی ناحیه‌ی زاگرس [۲۳] نشان داده شده است. این نقشه گویای این واقعیت است که در نواحی نزدیک به گسل‌های ناحیه‌ی مورد مطالعه، زمین‌لرزه‌ها دارای تمرکز بیشتری بوده و از بزرگی بیشتری برخوردارند و زلزله‌های دارای بزرگی‌های کمتر، بیشتر در مناطق دور از گسل‌ها رخ داده‌اند. بر این اساس می‌توان چنین گفت که گسل‌های فعال ناحیه، منشأ اصلی رخداد زلزله‌ها در این ناحیه به شمار می‌روند.

در این تحقیق، بررسی الگوی زمانی رخداد زلزله‌ها توسط دو روش آماری مورد مطالعه قرار گرفته است. روش اول تطابق توزیع زمانی رخداد زلزله‌ها با مدل توزیع پواسون است که بر اساس آن می‌توان به درجه‌ی تصادفی بودن این رخدادها در زمان پی برد. در روش دوم از مدل‌سازی سری‌های زمانی در یافتن الگوی مولد داده‌ها در زمان و به دست آوردن نظم زمانی رخداد زلزله‌ها کمک گرفته شده است.

۴-۱- ارزیابی تطابق با توزیع پواسون

کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این تحقیق که شامل داده‌های لرزه‌ای در یک بازه‌ی زمانی بیش از ۱۱ سال (از



شکل (۵): نقشه‌ی توزیع رومرکز زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰ ریشتر رخ‌داده در زاگرس، در بازه‌ی زمانی ابتدای سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی. گسل‌های اصلی ناحیه‌ی زاگرس در این نقشه نمایش داده شده‌اند.

آغاز سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی) است، برای مطالعه‌ی دقیق‌تر به ۱۴۲ زیرکاتالوگ ماهانه تبدیل شد و فراوانی رخداد زلزله‌ها با بزرگی‌های مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، به‌صورت جداگانه در هر ماه شمارش شده است. بر این اساس، تعداد کل رخداد زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، در بازه‌ی زمانی ذکر شده به‌ترتیب برابر با ۷۶۸، ۲۳۸ و ۷۲ رخداد می‌باشد. این داده‌ها با استفاده از تابع احتمال توزیع پواسون (رابطه ۱) و آزمون نیکویی برازش مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. پس از استخراج و آماده‌سازی داده‌ها و تبدیل کاتالوگ داده‌ها به ۱۴۲ زیرکاتالوگ ماهیانه و شمارش تعداد زلزله‌ها در هر ماه، برای بررسی تبعیّت الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس (برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر) از توزیع پواسون، باید فراوانی رخداد زلزله در ماه به‌صورت نظری و همچنین به‌صورت مشاهده‌ای محاسبه و با هم مقایسه شوند. هر چه این دو مقدار به هم نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده‌ی تبعیّت بیشتر الگوی زمانی لرزه‌خیزی از توزیع پواسون می‌باشد. در این راستا، برای محاسبه‌ی فراوانی رخداد زلزله‌ها در ماه به‌صورت نظری ابتدا باید مقدار نرخ میانگین رخداد زلزله‌ها، برای هر یک از بازه‌های بزرگی مورد نظر، محاسبه شود. نرخ میانگین رخداد زلزله (λ) را می‌توان به‌طور مستقیم با شمارش تعداد کل زلزله‌های ثبت شده و تقسیم آن بر بازه‌ی مورد نظر (۱۴۲ ماه) به دست آورد. در این مطالعه مقدار λ برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، به‌ترتیب برابر با ۵/۴۱، ۱/۶۸ و ۰/۵۱ زلزله در ماه می‌باشد. با داشتن این پارامتر، همان‌طور که در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است، احتمال رخداد زلزله در ماه به‌صورت پواسونی (P_i)، با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده و با ضرب احتمال پواسونی محاسبه شده در تعداد کل ماه‌ها (تعداد ۱۴۲ ماه)، فراوانی رخداد زلزله در ماه به‌صورت نظری (E_i) محاسبه شده است. برای محاسبه‌ی فراوانی رخداد زلزله‌ها در ماه به‌صورت مشاهده‌ای، نیاز است تعداد ماه‌هایی که دارای فراوانی‌های مختلف زلزله هستند شمارش شود. مثلاً چند ماه وجود دارد که تعداد رخداد زلزله‌ها با بزرگی مشخص در آنها برابر ۲ است. این مقادیر نیز برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر محاسبه شده و به‌ترتیب در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول (۱): فراوانی رخداد ماهانه‌ی زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰ ریشتر در ناحیه‌ی زاگرس و نتایج محاسبات آزمون آماری χ^2 در برازش مدل پواسون.

تعداد زلزله در ماه (x)	فراوانی مشاهده‌ای (O_i)	احتمال پواسون (P_x)	فراوانی نظری (E_i)	$\left[\frac{(O_i-E_i)^2}{E_i}\right]$
۲ و کمتر	۳۶	۰/۰۹۴	۱۳/۳۴۸	۳۴/۴۴۱
۳	۲۱	۰/۱۱۹	۱۶/۸۹۸	۰/۹۹۶
۴	۱۶	۰/۱۶۰	۲۲/۷۲۰	۱/۹۸۸
۵	۱۲	۰/۱۷۳	۲۴/۵۶۶	۶/۴۲۸
۶	۱۴	۰/۱۵۶	۲۲/۱۵۲	۳/۰۰۰
۷	۱۳	۰/۱۲۰	۱۷/۰۴۰	۰/۹۵۸
۸	۱۱	۰/۰۸۱	۱۱/۵۰۲	۰/۰۲۲
۹	۵	۰/۰۴۹	۶/۹۵۸	۰/۵۵۱
۱۰	۵	۰/۰۲۶	۳/۶۹۲	۰/۴۶۳
۱۱	۳	۰/۰۱۳	۱/۸۴۶	۰/۷۲۱
۱۲ و بیشتر	۶	۰/۰۰۷	۰/۹۹۴	۲۵/۲۱۱

جدول (۲): فراوانی رخداد ماهانه‌ی زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۵ ریشتر در ناحیه‌ی زاگرس و نتایج محاسبات آزمون آماری χ^2 در برازش مدل پواسون.

تعداد زلزله در ماه (x)	فراوانی مشاهده‌ای (O_i)	احتمال پواسون (P_x)	فراوانی نظری (E_i)	$\left[\frac{(O_i-E_i)^2}{E_i}\right]$
۰	۳۲	۰/۱۸۱	۲۵/۷۰۲	۱/۵۴۳
۱	۳۵	۰/۳۱۱	۴۴/۱۶۲	۱/۹۰۱
۲	۲۸	۰/۲۶۳	۳۷/۳۴۶	۲/۳۳۹
۳	۱۹	۰/۱۵۰	۲۱/۳۰۰	۰/۲۴۸
۴	۱۱	۰/۰۶۴	۹/۰۸۸	۰/۴۰۲
۵	۶	۰/۰۲۲	۳/۱۲۴	۲/۶۴۸
۶	۵	۰/۰۰۶	۰/۸۵۲	۲۰/۱۹۵
۷	۲	۰/۰۰۲	۰/۲۸۴	۱۰/۳۶۹
۸ و بیشتر	۱	۰/۰۰۱	۰/۱۴۲	۵/۱۸۴

جدول (۳): فراوانی رخداد ماهانه زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۵/۰ ریشتر در ناحیه‌ی زاگرس و نتایج محاسبات آزمون آماری χ^2 در برازش مدل پواسون.

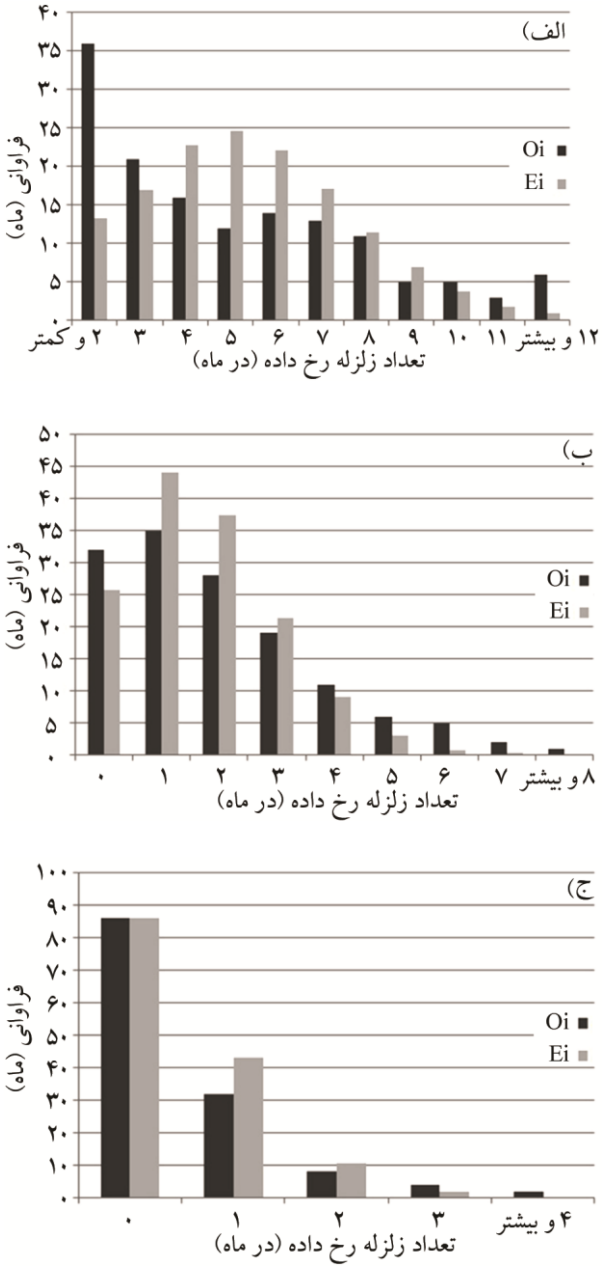
تعداد زلزله در ماه (x)	فراوانی مشاهده‌ای (O_i)	احتمال پواسون (P_x)	فراوانی نظری (E_i)	$\left[\frac{(O_i-E_i)^2}{E_i}\right]$
۰	۸۶	۰/۶۰۶	۸۶/۰۵۲	۰
۱	۳۲	۰/۳۰۳	۴۳/۰۲۶	۲/۸۲۶
۲	۸	۰/۰۷۶	۱۰/۷۹۲	۰/۷۲۲
۳	۴	۰/۰۱۳	۱/۸۴۶	۲/۵۱۳
۴ و بیشتر	۲	۰/۰۰۲	۰/۲۸۴	۱۰/۳۶۸

پس از محاسبه‌ی مقادیر فراوانی رخداد زلزله‌ها در ماه به‌صورت مشاهده‌ای و نظری برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، این مقادیر به‌منظور امکان مقایسه‌ی راحت‌تر در شکل‌های (۶ الف)، (۶ ب) و (۶ ج) به‌صورت نمودارهایی مجزّا نمایش داده شده‌اند. با توجه به این مقایسه و اختلاف قابل‌توجه مقادیر فراوانی مشاهده‌ای و نظری، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس برای زلزله‌های با بزرگی‌های مورد نظر در این تحقیق، به‌طور کامل از توزیع پواسون تبعیّت نمی‌کند، لیکن برای بازه‌های بزرگی بیشتر، این الگو به توزیع پواسون نزدیک است.

در این تحقیق، برای ارزیابی دقیق‌تر تبعیّت الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس برای بزرگی‌های مورد نظر از توزیع پواسون و همچنین برای بررسی ارتباط میان بزرگی زلزله‌ها و تبعیّت الگوی زمانی لرزه‌خیزی از توزیع پواسون، از یک آزمون آماری به نام آزمون مربع χ (مربع کای)[۱۲] استفاده شده است. در این آزمون، مقداری کمّی به نام χ^2 با فرمول زیر محاسبه شده است.

$$\chi^2 = \sum\left[\frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}\right] \qquad (۲)$$

در این فرمول، O_i تعداد رخدادهای مشاهده شده در ماه و E_i تعداد رخدادهای مورد انتظار در ماه بر اساس توزیع پواسون است. این مقادیر پس از محاسبه برای زلزله‌های با بزرگی‌های



شکل (۶): نمودار تغییرات فراوانی ماهانه مشاهده‌ای (O_i) و تئوری (E_i)، برازش شده با مدل پواسون، رخداد زلزله‌های الف) با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰ ریشتر ب) با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۵ ریشتر ج) با بزرگی مساوی و بیش از ۵/۰ ریشتر در زاگرس در بازه‌ی زمانی آغاز سال ۲۰۰۵ تا پایان ماه اکتبر ۲۰۱۶ میلادی.

مورد نظر، در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است. در این آزمون با توجه به جدول آماری آزمون مربع χ، مقدار بحرانی مربع χ نیز به دست می‌آید. بر اساس محاسبات انجام شده، مقدار کمّی مربع χ برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، به‌ترتیب برابر با ۷۸/۷۸، ۴۴/۸۳ و ۱۶/۴۳ و مقدار

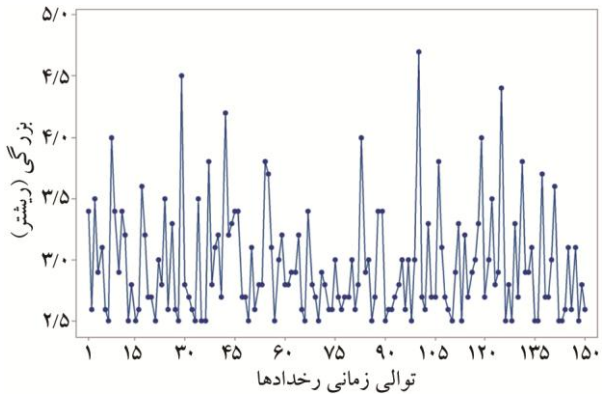
بحرانی مربع x نیز برای سطح اطمینان ۹۵ درصد، به‌ترتیب برابر با ۱۶/۹۱۹، ۱۴/۰۶۷ و ۷/۸۱۵ است. اختلاف مقدار مشاهده‌ای و مقدار بحرانی مربع χ نشان می‌دهد که الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس، برای محدوده‌ی بزرگی‌های مورد نظر از توزیع پواسون تبعیّت نمی‌کند، اما هرچقدر بزرگی زلزله‌ها بیشتر باشد، الگوی زمانی لرزه‌خیزی به توزیع پواسون نزدیک‌تر است و مقدار مشاهده شده و مقدار بحرانی مربع χ اختلاف کمتری با هم دارند.

با توجه به تجزیه‌وتحلیل‌های صورت گرفته و محاسبه‌ی احتمال رخداد زلزله‌ها برای هر یک از فراوانی‌های زلزله در ماه، بر اساس احتمالات مشاهده‌ای و نظری و مقایسه‌ی آنها برای بزرگی‌های مورد نظر و همچنین با استفاده از آزمون آماری مربع χ، می‌توان گفت در سطح خطای ۵ درصد الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر، از توزیع پواسون تبعیّت نمی‌کند؛ بنابراین توزیع زمانی رخداد این زلزله‌ها از الگوی احتمالی دیگری پیروی می‌کند. همچنین هرچقدر زلزله‌ها دارای بزرگی بیشتری باشند و یا هرچقدر مقدار نرخ میانگین رخداد زلزله‌ها کمتر باشد، الگوی زمانی لرزه‌خیزی به توزیع پواسون نزدیک‌تر است. بنابراین برای بازه‌ی زمانی طولانی‌تر و همچنین زلزله‌های با بزرگی بیشتر، این امکان وجود دارد که الگوی زمانی لرزه‌خیزی از توزیع پواسون تبعیّت کند و بر این اساس بتوان دوره‌ی بازگشت مناسبی را برای رخداد زلزله‌های بزرگ و خطرناک پیش‌بینی کرد.

۴-۲- تحلیل سری‌های زمانی داده‌ها

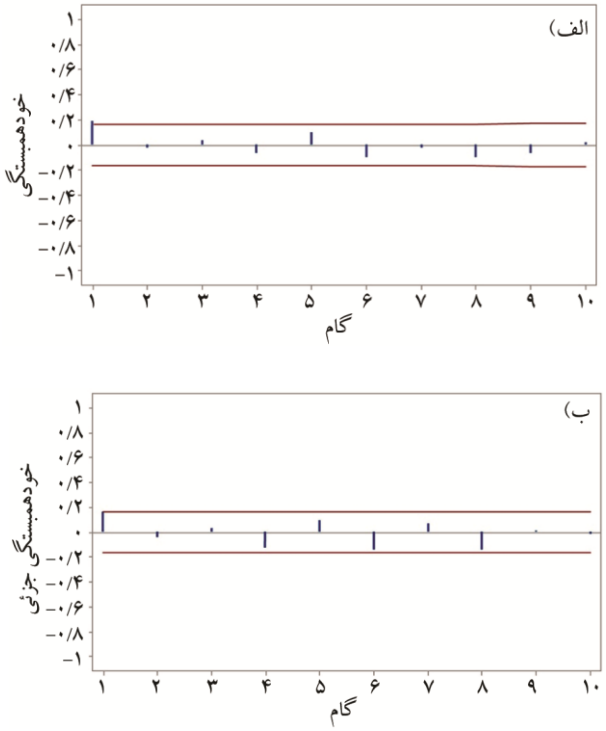
برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از سری‌های زمانی، روش‌های مختلفی وجود دارد. از جمله‌ی این روش‌های معمول، برازش مدل‌های ARMA می‌باشد که دارای دقت نسبتاً بالایی است. غالباً اگر تعداد داده‌ها به‌اندازه‌ی کافی باشد (بیش از ۵۰ مشاهده)، می‌توان از این مدل‌ها به‌خوبی جهت برازش به داده‌ها استفاده نمود. در این مطالعه از برازش مدل‌های ARMA برای پیدا کردن الگوی مولد داده‌های لرزه‌ای در ناحیه‌ی زاگرس از نظر بزرگی و عمق کانونی و این‌که این داده‌ها از چه الگوی آماری تبعیّت می‌کنند، استفاده شده است.

در این مطالعه مراحل برازش مدل با استفاده از ۱۵۰ داده‌ی لرزه‌ای انتهایی کاتالوگ داده‌ای مورد استفاده انجام شده است. تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری مینی تب[۱۳] صورت گرفته و نتایج، مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته است. در شکل (۷) نمودار سری زمانی، برای سری داده‌های بزرگی زلزله‌ها نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، مشخص می‌شود که داده‌ها حول یک خط افقی دارای تغییرات تصادفی هستند و هیچ‌گونه روند، سیکل و تغییرات فصلی در آنها وجود ندارد و این امر حاکی از ایستا بودن سری می‌باشد.



شکل (۷): سری زمانی تغییرات بزرگی (ریشتر) ۱۵۰ رخداد انتهایی کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در تحقیق.

نمودار خودهمبستگی[۱۴] و خودهمبستگی جزئی[۱۵]، اطلاعات اولیه‌ای را در مورد الگوی مولد داده‌ها و تشخیص تقریبی مدل سری‌های زمانی فراهم می‌کنند. در شکل‌های (۸ الف) و (۸ ب) به ترتیب نمودارهای خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی سری داده‌های بزرگی زلزله‌ها نشان داده شده‌است. با توجه به این دو نمودار، ملاحظه می‌شود در هردو نمودار، خودهمبستگی‌ها از تأخیر ۱ به‌بعد افت شدید داشته‌اند. به‌عبارت‌دیگر خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی بعد از تأخیر ۱ معنادار نیستند. بنابراین الگوی پیشنهادی در این سری زمانی، الگوی ARMA(1,1) می‌باشد.



شکل (۸): نمودار تغییرات الف) خودهمبستگی و ب) خودهمبستگی جزئی بر حسب طول گام در مدل‌سازی سری زمانی تغییرات بزرگی زلزله‌های رخداده در زاگرس.

پس از تعیین تقریبی رتبه‌های مدل، باید مدل را برازش داد. الگوی ARMA(1,1) به داده‌ها برازش شده است و خروجی (۱) در نرم‌افزار مینی تب، برآورد پارامترهای مدل و آزمون فرض معناداری هر یک را نشان می‌دهد و مقدار آماره‌ی T و احتمال بامعنایی p دلالت بر معناداری ضرایب دارند.

خروجی (۱):

Final Estimates of Parameters

Type		Coef	SECoef	T	P
AR	1	-0.6569	0.1488	-4.16	0.000
MA	1	-0.8845	0.0933	-9.65	0.000
Constant		3.81254	0.09834	35.66	0.000
Mean		2.26332	0.05556		

Number of observations: 150
Residuals: SS = 65.2334 (backforecasts excluded)
MS = 0.4460 DF = 147

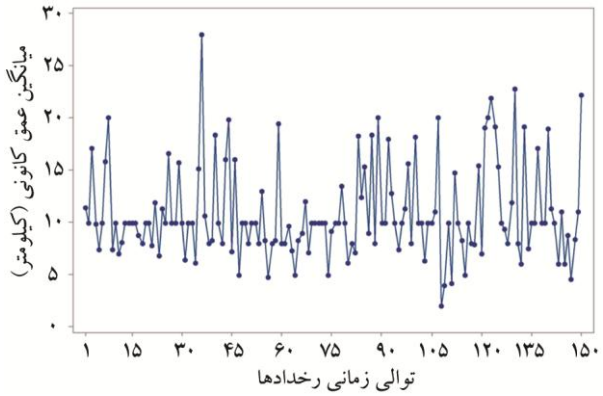
جهت ارزیابی مدل، آزمون باکس پیرس کای دو[۱۶] [۲۲] انجام شده است و مقادیر p در تأخیرهای مختلف نشان می‌دهند مدل برازش شده مناسب است، زیرا هرچه تأخیر بزرگ‌تر می‌شود، مقدار p بیشتر شده و این امر نشان می‌دهد مدلی که به داده‌ها برازش شده است، مناسب می‌باشد. خروجی (۲) نرم‌افزار مینی تب در ارزیابی و صحت‌سنجی مدل در ادامه ارائه می‌شود.

خروجی (۲):

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic

Lag	12	24	36	48
Chi-Square	9.8	13.1	22.6	33.5
DF	9	21	33	45
P-Value	0.388	0.967	0.933	0.902

نمودار سری زمانی برای داده‌های عمق کانونی زلزله‌ها نیز پس از هموارسازی به روش میانگین متحرک، با استفاده از نرم‌افزار مینی تب تهیه شده است که در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل (۹): سری زمانی تغییرات عمق کانونی (ریشتر) ۱۵۰ رخداد انتهایی کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در تحقیق.

شکل‌های (۱۰ الف) و (۱۰ ب)، نیز به‌ترتیب نمودارهای خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی سری داده‌های عمق کانونی زلزله‌ها را نشان می‌دهند. با توجه به این دو نمودار ملاحظه می‌شود خودهمبستگی از تأخیر ۲ به بعد افت شدید داشته است و خودهمبستگی جزئی نیز بعد از تأخیر ۱، ۴ و ۷ افت شدید داشته و معنادار نیست؛ بنابراین الگوی پیشنهادی این سری زمانی ARMA(0,1) و ARMA(0,2) می‌باشد. الگوی ARMA(0,1) و ARMA(0,2) به داده‌ها برازش شده و خروجی (۳) برآورد پارامترهای مدل و آزمون فرض معناداری هر یک را نشان می‌دهد. مقدار آماره T و احتمال با معنایی p دلالت بر معناداری ضرایب دارند.

خروجی (۳):

Final Estimates of Parameters

Type		Coef	SE Coef	T	P
MA	1	-0.9416	0.0332	-31.32	0.000
MA	2	-0.9816	0.0222	-43.65	0.000
Constant		9.6221	0.1712	58.22	0.000
Mean		9.6221	0.1712		

Number of observations: 148

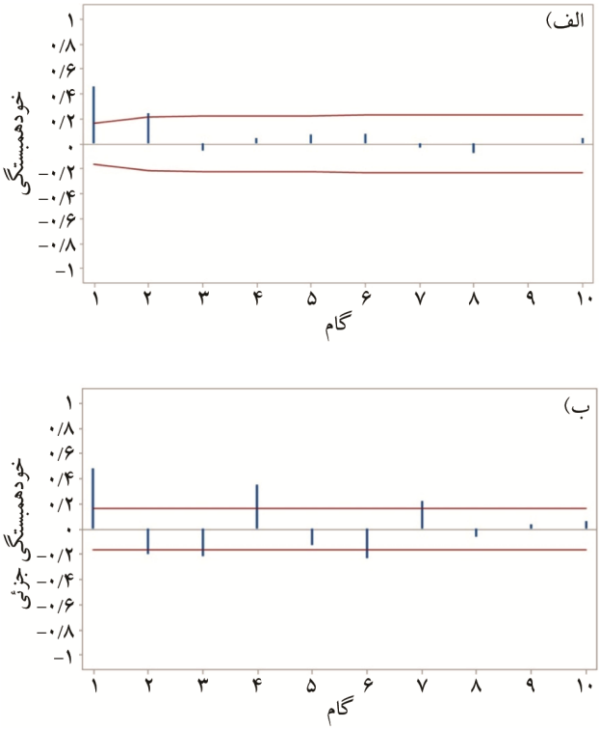
Residuals: SS = 96.3245 (backforecasts excluded)
MS = 0.6733 DF = 145

همچنین جهت ارزیابی مدل، آزمون باکس پیرس کای دو [۲۲] انجام شده است و مقادیر p در تأخیرهای ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ نشان می‌دهد، مدل برازش شده مناسب است. خروجی (۴) نرم‌افزار مینی تب در ارزیابی و صحت‌سنجی مدل در ادامه ارائه می‌شود.

خروجی (۴):

Modified Box-Pierce (Ljung-Box) Chi-Square statistic

Lag	12	24	36	48
Chi-Square	10.7	19.8	30.7	61.2
DF	9	21	33	45
P-Value	0.128	0.301	0.456	0.028



شکل (۱۰): نمودار تغییرات الف) خودهمبستگی و ب) خودهمبستگی جزئی بر حسب طول گام در مدل‌سازی سری زمانی تغییرات عمق کانونی زلزله‌های رخداده در زاگرس.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به تجزیه‌وتحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌های لرزه‌ای ناحیه‌ی زاگرس با استفاده از توزیع پواسون و محاسبه‌ی احتمال رخداد زلزله‌ها برای هر یک از فراوانی‌های زلزله در ماه، بر اساس احتمالات مشاهده‌ای و نظری و مقایسه‌ی آنها، برای زلزله‌های با بزرگی مساوی و بیش از ۴/۰، ۴/۵ و ۵/۰ ریشتر و همچنین با توجه به نتایج آزمون آماری مربع کای، می‌توان گفت در سطح خطای ۵ درصد، الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس برای زلزله‌های با بزرگی مورد نظر، از توزیع پواسون تبعیّت نمی‌کند، اما هرچقدر زلزله‌ها دارای بزرگی بیشتری باشند و یا هر چه مقدار نرخ میانگین رخداد زلزله‌ها کمتر باشد، الگوی زمانی لرزه‌خیزی به توزیع پواسون نزدیک‌تر است؛ بنابراین برای بازه‌ی زمانی طولانی‌تر و همچنین برای زلزله‌های با بزرگی بیشتر، این امکان وجود دارد که الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس از توزیع پواسون تبعیت کند و بر این اساس بتوان رخداد زلزله‌های بزرگ و پرخطر را پیش‌بینی کرد.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده بر روی توالی زمانی داده‌های مربوط به بزرگی و عمق کانونی زلزله‌ها با استفاده از روش سری‌های زمانی و همچنین با توجه به آزمون باکس و پیرس مشخص شد به داده‌های با متغیر بزرگی، مدل ARMA(1,1) برازنده است اما به داده‌های با متغیر عمق، که دارای بی‌نظمی بیشتری بوده و از دقت کافی نیز برخوردار نیستند، مدل‌های ARMA(0,1) و ARMA(0,2) برازنده است. برازش این الگوهای آماری به داده‌های لرزه‌ای که حاکی از وجود نظم در الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس می‌باشد، فرضیه‌ی تصادفی بودن رخداد زمین‌لرزه‌ها را در این ناحیه از نظر زمان رد می‌کند.

این پژوهش که با هدف بررسی کاربرد روش‌های آماری در مطالعه‌ی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در ناحیه‌ی زاگرس انجام شد، دارای محدودیت‌هایی نیز بوده است. این محدودیت‌ها، زمینه‌ای برای تحقیقات بیشتر و گسترده‌تر فراهم می‌کند. از جمله

پیشنهادهایی که می‌توان جهت تحقیقات بیشتر در آینده به آنها اشاره نمود عبارتند از:

- در این تحقیق، به علت عدم دقت بالای داده‌های عمق کانونی، الگوی مولد این داده‌ها بعد از هموارسازی نمودار سری‌های زمانی آن به‌دست‌آمده است و به علت داشتن بی‌نظمی، دارای اعتبار نیست و پیشنهاد می‌شود که با مطالعات بیشتر، دقت داده‌های عمق کانونی برای حاصل شدن نتایج بهتر، افزایش یابد.
- با توجه به ناهمگنی ساختاری ناحیه‌ی زاگرس، پیشنهاد می‌شود بررسی الگوی زمانی لرزه‌خیزی در بخش‌های مختلف این ناحیه‌ی وسیع، به‌طور مجزّا صورت گیرد و سپس به مقایسه‌ی نتایج و تحلیل آنها پرداخته شود.
- کوتاهی بازه‌ی زمانی داده‌های مورد استفاده در این تحقیق و نبود دقت کافی در این داده‌ها، از مهم‌ترین کاستی‌های این پژوهش محسوب می‌شود که انتظار می‌رود در آینده با در دسترس قرار گرفتن داده‌های مناسب‌تر، بتوان به نتایج بهتری در این موضوع تحقیقی دست یافت.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مادی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه دامغان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود. از داوران محترم مقاله، که با نقطه نظرات و پیشنهادهای خود باعث ارتقاء این تحقیق شدند، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

1. Altinok, Y. and Kolcak, D. (1999) An application of the semi-Markov model for earthquake occurrences in North Anatolia, Turkey. *Journal of Balkan Geophysical Society*, **2**(4), 90-99.
2. Morales-Esteban, A., Martinez- Alvarez, F., Troncoso, A., Justo, J.L., and Rubio-Escudero, C. (2010) Pattern recognition to forecast seismic time series. *Expert Systems with Application*, **37**(12), 8333-8342.
3. Wang, J.P., Huang, D., Chang, S.C., and Wu, Y.M. (2014) New evidence and perspective to the Poisson process and earthquake temporal distribution from 55,000 events around Taiwan since 1900. *Natural Hazards Review*, **15**(1), 38- 47.
4. Bossard, A. (2014) Analysis of the Poisson distribution applicability to the Japanese seismic activity. *International Conference on Advanced Applied Informatics*, **93**, 430- 435.
5. Wang, J.P. and Chin Chang, S.U. (2015) Evidence in support of seismic hazard following Poisson distribution. *Physica A*, **424**, 207-216.
6. Zamani, A. and Agh-Atabai, M. (2009) Temporal characteristics of seismicity in the Alborz and Zagros regions of Iran, using a multifractal approach. *Journal of Geodynamics*, **47**(5), 271-279.
7. Pashapoor, M., Khorshidian, K., and Khalili, M. (2014) The parametric estimation and prediction of earthquake occurrences in the south of Iran based on a semi-Markov model. *Journal of Advanced Mathematical modeling*, **3**(2), 1-20 [in Persian].
8. Mohebbi, M. and Abedini, Y. (2006) Analysis of the earthquake data using time series and prediction methods. *Iranian National Conference on Physics*, Shahrud University of Technology, Shahrud, Iran [in Persian].
9. Zuniga, F.R., Reyners, M., and Villamor, P. (2005) Temporal variations of the earthquake data in the catalogue of seismicity of New Zealand. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **38**(2), 87-105.
10. Amei, A., Fu, W., and Ho, C. (2012) Time series analysis for predicting the occurrences of large scale earthquakes. *International Journal of Applied Science and Technology*, **2**(7), 64-75.
11. Hong, L.L. and Guo, S.W. (1995) Nonstationary Poisson Model for Earthquake Occurrences. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **85**, 814-824.
12. Telesca, L., Cuomo, V., Lapenna, V., and Macchiato, M. (2001) Identifying space time clustering properties of the 1983-1997 Irpinia-Basilicata (southern Italy) seismicity. *Tectonophysics*, **330**, 93-102.
13. Berberian, M. (1981) 'Active faulting and tectonics of Iran'. In: *Zagros Hindukush-Himalaya Geodynamic Evolution.* Geodynamics Series, 3, Gupta, H.K., Delany, F.M. (Eds) American

Geophysical Union Washington, DC and Geological Society of America, Boulder, CO, 33-69.

14. Takin, M. (1972) Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, **235**, 147-150.
15. Falcon, N.L. (1969) 'Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros Range'. In: *Time and Place in Orogeny*, Kent, P.E., Satterthwaite, G.E. and Spencer, A.M. (Eds), 3, Geol. Soc. Lonon, Spec. Publ., 9-22.
16. Swan, A.R.H. and Sandilands, M.H. (1995) *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Science, Oxford.
17. Schuenemeyer, J.H. and Drew, L.J. (2011) *Statistics for Earth and Environmental Scientists.* John Willy & Sons, Inc., Hoboken.
18. Kagan, Y.Y. (1993) Statistics of Characteristic Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, 7-24.
19. Kagan, Y.Y. (2010) Statistical distribution of earthquake numbers: consequence of branching process. *Geophysical Journal International*, **180** (3), 1313-1328.
20. Armstrong, J.S. (2001) *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners.* Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
21. Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1976) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
22. Brockwell, P.J. and Davis, R.A. (2002) *Introduction to Time Series and Forecasting*. 2nd Edition. Springer-Verlag, New York.
23. Hessami, Kh., Jamali, F., and Tabassi, H. (2003) *Map of Major Faults of Iran*, scale; 1:2,500,000. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran [in Persian].

واژه‌نامه

۱- الگوی زمانی	Temporal Pattern
۲- توزیع پواسون	Poisson Distribution
۳- تحلیل سری‌های زمانی	Time Series Analysis
۴- لرزه‌زمین‌ساخت	Seismotectonics
۵- ایستا	Stationary
۶- غیرایستا	Non-Stationary
۷- اتورگرسیو	Auto Regressive
۸- میانگین متحرک	Moving Average
۹- بزرگای کامل بودن داده‌ها	Magnitude of Completeness, Mc
۱۰- بدون خوشه‌بندی	Declustered
۱۱- ریزنبرگ	Reasenberg
۱۲- آزمون مربع کای	Chi-Square Test
۱۳- نرم‌افزار مینی تب	Minitab Software
۱۴- خودهمبستگی	Autocorrelation
۱۵- خودهمبستگی جزئی	Partial Autocorrelation
۱۶- آزمون باکس پیرس کای دو	Box-Pierce Chi-Square Test

Statistical Analysis of the Temporal Pattern of Seismicity in the Zagros Region

Somayeh Rostami[1], Seyed Naser Hashemi[2*], Mosayeb Ahmadi[3]

1. M.Sc. Student, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran
2. Assistant Professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran,
*Corresponding author, email: hashemi@du.ac.ir
3. Assistant Professor, School of Mathematics and Computer Science, Damghan University, Damghan, Iran

Introduction:

Earthquake is one of the major natural disasters that the current knowledge of the human kind is not able to predict it yet; however, it can be partly subjected to risk assessment and recognition of its pattern by using statistical methods. The Zagros region of Iran is known for its high seismic activity. This mountain belt is amongst the world's most seismically active mountain ranges. This seismogenic zone is the result of the collision between the Arabian and Eurasian plates during the Cenozoic. Seismic activity in this zone is characterized by the occurrence of low to moderate magnitude earthquakes, most of which nucleate on blind (hidden) thrust faults. In this study, the temporal pattern of occurrence of earthquakes in the Zagros region for a period of more than 11 years, from the beginning of 2005 to the end of October 2016, have been examined using statistical methods. In this regard, the matching degree of the examined data with the Poisson distribution was evaluated and time series analysis of the data was carried out.

Methodology and Data Analysis:

Randomness in time, space and size is the most obvious property of earthquake occurrence. At the same time, there are ample evidences to suggest that earthquakes do not occur in a completely disordered manner. The randomness of the occurrence of earthquakes in time or space can be evaluated by statistical methods such as Poisson distribution fitting test. In addition, time series analysis has been widely used in many applications, e.g. earthquake forecasting and the temporal pattern of earthquake occurrences, as a stochastic process, can be studied by this method. In this study, by using the goodness of fit test based on the chi-square statistic, the suitability of the Poisson distribution with λ parameter (the average rate of the earthquake occurrence) fitness to seismic data of the region with different ranges was assessed. Additionally, in this research, due to the low randomness degree of the data in time, the time series modeling of the data were carried out to find the productive time pattern model of the data. A sample of 150 data, covering the end part of the catalogue, was selected for the analysis and modeling of time series, and two main attributes of the earthquake data, magnitude and focal depth, as quantitative variables, were included in this modeling.

Results and Discussion:

According to the obtained results, it can be said that temporal distribution of these data do not completely follow the Poisson distribution model, but with increasing the earthquake magnitude, the data probability distribution approaches to the Poisson distribution. Besides, the results of the time series analysis of data show that the temporal pattern of earthquake occurrence based on the magnitude variable has a good correlation with ARMA (1, 1) model. Similarly, considering the focal depth as variable in modeling, the time series models acceptably match ARMA (0, 1) and ARMA (0,2) models. These findings were verified by Box and Pierce method. According to the obtained results of this research, it is concluded that the earthquake occurrence in the Zagros region do not completely show a random pattern, and time series analysis modeling can be acceptably employed for finding the temporal behavior of seismicity in this

region. However, the techniques used in this research are data driven and the reliability of the results obtained depends on the quality of the input datasets. Due to the insufficiency and inaccuracy of the studied data catalogue, it is expected that in future, more appropriate and reliable results could be achieved by reducing the seismic data errors and using the data with longer time periods.

Keywords: Temporal Pattern, Seismicity, Poisson Distribution, Zagros Region, Time Series Analysis, Seismotectonics.