



سجل از دور

GIS ایران



سال دوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۸۹  
Vol.2, No.2, Summer 2010  
۷۰-۵۵

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

## بررسی الگوهای زمانی- مکانی در داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران، با استفاده از شاخص‌ها و مدل‌های آمار فضایی

مهدی هاشمی\*<sup>۱</sup>، عباس علیمحمدی سراب<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
۲. استادیار گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۳/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۶/۲۳

### چکیده

کاهش آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لرزه و برنامه‌ریزی صحیح به‌منظور مقابله با آن، نیازمند اطلاعات درست و دقیق و روزآمد یا به‌نگام است. در این مقاله داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر در ایران از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ مورد ارزیابی‌های آماری قرار گرفته‌اند. ابتدا وجود روند کلی بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها در دو جهت شمالی - جنوبی و شرقی - غربی بررسی گردیدند و مشخص شد که روند قابل تشخیصی در بزرگی زمین‌لرزه‌ها وجود ندارد. به‌منظور بررسی وجود خودهمبستگی مکانی بین زمین‌لرزه‌ها، شاخص‌های میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه و  $K(d)$  - که هر دو فاصله‌منا هستند - مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شده است که زمین‌لرزه‌ها به شدت از الگوی خوشه‌ای تبعیت می‌کنند. اما شاخص‌های واریوگرام،  $G$  و  $I$  Global Moran's نشان دادند که بزرگی زلزله‌ها خودهمبسته نیستند. برای اطمینان از فقدان خودهمبستگی بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها با توجه به تعداد زیاد آنها، منطقه مورد مطالعه به شبکه‌های یک کیلومتری تقسیم‌بندی شد و مقادیر ماکزیمم و میانگین بزرگی زلزله‌ها نیز در هر شبکه تعیین گردیدند. سپس وجود خودهمبستگی بین هر یک از خصوصیات پیکسل‌ها با استفاده از واریوگرام بررسی شد. در مرحله بعد، به‌منظور بررسی رفتار زمانی زمین‌لرزه‌ها، نمودار فراوانی تجمعی آنها براساس زمان و نمودار بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در هر سال رسم شدند. بررسی این نمودارها مشخص ساخت که زمین‌لرزه‌های بزرگ همیشه وجود داشته‌اند. در نهایت نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها براساس فاصله از گسل نشان داد که ۹۰ درصد زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران در فاصله کمتر از ۴۰ کیلومتری گسل‌ها رخ داده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بررسی و کشف مناطق لرزه‌خیز و پهنه‌بندی لرزه‌ای، بررسی روند زمین‌لرزه‌ها و پیش‌بینی رخدادهای بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** زمین‌لرزه، آنالیز مکانی، الگوی مکانی، همبستگی.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر (عج)، بالاتر از تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، تلفن: ۰۹۳۶۲۲۴۲۶۴۶

## ۱- مقدمه

همه ساله بحران‌های طبیعی متعددی همچون زمین‌لرزه و طوفان و سیل در بخش‌های مختلفی از جهان رخ می‌دهند و زیان‌ها و خسارت‌های گاه جبران‌ناپذیری را به بار می‌آورند. سرزمین ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناختی آن در زمرهٔ ده کشور سانحه‌خیز جهان جای دارد (Martini, et al., 1998) و همواره بر اثر بروز سوانحی چون سیل، زمین‌لرزه، خشکسالی، طوفان و جز اینها خسارات جانی و مالی فراوانی به کشور وارد شده است و می‌شود. هزینه‌ها و تلفات زمین‌لرزه بسیار بیشتر از ویرانی‌های ظاهری ناشی از آن است. به عنوان مثال، مشکلاتی چون قطع برق که در زیرساخت‌های شهری پیش می‌آید، تلفات سنگینی را بر اقتصاد کشور تحمیل می‌کند (Rosea & Lim, 2002). بلایای طبیعی هر سال نزدیک به دو هزار میلیارد تومان به ایران خسارت وارد می‌سازند. آمار نشان می‌دهد که طی صد سال گذشته، سیزده زلزله به بزرگی بیشتر از هفت ریشتر در کشور رخ داده است و به طور متوسط هر ده سال یک بار زلزله‌ای به بزرگی هفت ریشتر، و هر دو سال یک‌بار نیز زلزله‌ای به بزرگی بیش از دو ریشتر، به وقوع پیوسته است. و این در حالی است که روستاهای کشور در برابر زمین‌لرزه ۵ ریشتری، و شهرهای ما در برابر زمین‌لرزه‌ای ۶ ریشتری، به شدت آسیب‌پذیرند (Hashemi & Alesheikh, 2010; www.AfarineshDaily.ir).

از همین رو، سال‌هاست که راه‌های کاهش تأثیرات و تبعات سوانح طبیعی در کشور، مورد توجه قرار گرفته است و تلاش می‌شود تا همگام با تجربه‌های جهانی در این حوزه، شاخص ایمنی و آمادگی در برابر سوانح طبیعی ارتقا یابد (Handmer & Dovers, 2007). کاهش تأثیرات و پیامدهای زمین‌لرزه و یا به عبارت دیگر، کاهش آسیب‌پذیری جوامع بشری در برابر این پدیده زمانی به وقوع خواهد پیوست که ایمنی شهر در برابر مخاطرات زمین‌لرزه در تمامی سطوح برنامه‌ریزی

مدنظر قرار گیرد (Handmer & Dovers, 2007) اما به هر حال تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی صحیح مسلماً به اطلاعات صحیح و دقیق و روزآمد نیاز دارد. از سوی دیگر، چون اکثر اطلاعات مورد نیاز در مقوله شهری از جمله زمین‌لرزه ماهیت مکانی دارند، لذا علم و فناوری سیستم اطلاعات مکانی می‌تواند در جهت سامان‌دهی و تجزیه و تحلیل جامع و سریع اطلاعات و کمک به تصمیم‌گیری‌های مناسب در مدیریت بحران، مورد استفاده قرار گیرد (Sassa, 2004).

زمین‌آمار<sup>۱</sup> زیرشاخه‌ای از علم آمار مکانی است که در آن داده‌ها دربردارندهٔ نمونه‌های محدودی از مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ یکی از پدیده‌های پیوسته مکانی - مانند ارتفاع از سطح دریا - هستند. واژه زمین‌آمار را نخستین بار ماترون (Matheron, 1963) در فرانسه به کار برد تا کارش را در پیشگویی مکانی در صنعت معدن توصیف کند. اما امروزه روش‌های زمین‌آمار در حیطه‌ها و مقوله‌های گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Diggle & Jr., 2007).

Diggle, Tawn و Moyeed در سال ۱۹۹۸ عبارت یا اصطلاح زمین‌آمار مدلی<sup>۲</sup> را به کار بردند تا روشی را برای بررسی مسائل زمین‌آمار براساس استفاده از روش‌های آماری رسمی در مدل‌هایی که تصادفی فرض می‌شوند، توصیف کنند (Diggle & Jr., 2007). آمار مکانی<sup>۳</sup> بیانگر مدل‌ها و روش‌های آماری است که داده‌های مکانی را آنالیز می‌کنند.

آنالیز مکانی<sup>۴</sup> مشتمل بر فنون یا روش‌ها و تکنیک‌هایی برای کشف و نمایش الگوهای موجود در داده‌های مکانی است تا با استفاده از آنها فرایندهای موجود در دنیای واقعی مدل‌سازی شود و بتوان عملیات پیشگیری یا پیش‌بینی را طراحی کرد (O'Sullivan & Unwin, 2007).

1. Geostatistics
2. Model-based Geostatistics
3. Spatial Statistics
4. Spatial Analysis

به صورت کمی بررسی کردند. در این مقاله فاکتورهای کنترل‌کننده زمین‌لغزش‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی، دامنه ناهمواری، شیب و توپوگرافی به دست آمد و افزون بر آنها رابطه‌ای نیز بین تعداد لغزش‌ها و فاصله تا مرکز زمین‌لرزه تعیین شد. لوزی و پرگالانی (Luzi & Pergalani, 2000) معتقد بودند که بین جنس زمین و پارامترهای لغزش زمین، همبستگی وجود دارد. در این مقاله تأثیرات سطحی ناشی از زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ در شهر Marche-Umbria در کشور ایتالیا با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی به دست آمد. از طرف دیگر، تأثیرات سطحی بر اساس جنس زمین پیش‌تر در مقاله‌های دیگری تدوین و فرموله شده بود. در این مقاله به منظور بررسی کارایی آن روابط، به مقایسه تأثیرات واقعی سطح و تأثیرات و تبعات به بار آمده از هر یک از روابط، پرداخته شده است.

فنگا و همکاران (Fenga et al., 2004) الگوی تغییرات مکانی در رطوبت خاک را در بخشی از علفزارهای شهر Tsukuba در کشور ژاپن بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار خودهمبستگی از ۰/۵۷۷ شروع می‌شود و وقتی فاصله نقاط به ۷۵۰ متر می‌رسد، خودهمبستگی صفر می‌گردد. البته بعد از ۷۵۰ متر، خودهمبستگی به صورت متناوب، مثبت و منفی می‌شود؛ یعنی خاک و اکوسیستم<sup>۱</sup> تغییرات متناوبی را نشان می‌دهند. دنگ و همکاران (Deng et al., 2007) با استفاده از دو شاخص Moran's I و Pearson's I، رابطه بین ویژگی‌های توپوگرافی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI<sup>۲</sup>) را در مناطق کوهستانی بررسی کردند. یانگ و همکاران (Yang et al., 2010) روشی را

در اینجا برخی از پژوهش‌های مرتبط با آنالیزهای مکانی مورد بررسی قرار می‌گیرند. شبستری و همکاران (Shabestari et al., 2004) با استفاده از درون‌یابی به روش کریجینگ<sup>۱</sup>، توزیع مکانی حرکات بزرگ سطح زمین را در بسترهای سنگی<sup>۲</sup> تعیین کردند و به معرفی و ارائه رابطه‌ای ضعیف به عنوان مؤلفه روند<sup>۳</sup> پرداختند. سپس نوعی خودهمبستگی<sup>۴</sup> نسبتاً خوب و مناسب را بین پارامترهای لغزش<sup>۵</sup> تخمین زده‌شده و واقعی در ایستگاه‌های لرزه‌شناسی کشف کردند. خزایی و سیتار (Khazai & Sitar, 2003) عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه را بررسی کردند. این عوامل عبارت‌اند از: نوع زمین، اندازه واحد زمین‌شناسی، زاویه شیب، بستر سنگی، حرکت زمین و فاصله تا کانون زلزله. کمپ و همکاران (Kamp et al., 2008) عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله سال ۲۰۰۵ کاشمر را بررسی کردند و با ارزیابی‌ای چندمعیاره، پارامترهای لیتولوژی<sup>۶</sup>، گسل، زاویه شیب، جهت شیب، ارتفاع، پوشش زمین، رودخانه و جاده‌ها را به عنوان عوامل مؤثر بر ایجاد لغزش برشمردند. چنگ و همکاران (Chang et al., 2007) معتقد بودند که عواملی چون طوفان، زمین‌لرزه و بارش باران می‌تواند موجب لغزش زمین شود و مدل یا مدل‌هایی را برای لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه و لغزش‌های ناشی از طوفان به وجود آوردند و شکل دادند و این مدل‌ها را با طوفان‌ها و زمین‌لرزه‌های واقعی آزمودند. در نهایت، مشخص شد که طوفان‌ها در محل رودخانه‌ها و زمین‌لرزه‌ها در محل پل‌ها بسیار خطرناک‌اند. گالوسی و کوکولاس (Gallousi & Koukouvelas, 2007) با استفاده از عکس‌های هوایی در فاصله سال‌های ۱۹۴۵ تا ۱۹۹۱ تغییرات شکل زمین را بر اثر دو زمین‌لغزش بزرگ در کنار گسل فعال Marathias در امتداد خلیج Corinth در کشور یونان بررسی کردند. زمین‌لغزش‌های محدوده مطالعاتی با خوشه‌های زمین‌لرزه در این منطقه همبستگی<sup>۷</sup> داشتند. جینهویی و همکاران (Jinhui et al., 2010) لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه را

1. Kriging
2. Bedrock
3. Trend
4. Autocorrelation
5. Landslide
6. Lithology
7. Correlation
8. Ecosystem
9. Normalized Difference Vegetation Index

دایره‌های قرمز رنگ، و موقعیت گسل‌ها با خطوط آبی رنگ نشان داده شده‌اند.

## ۲-۲- واریوگرام و شاخص‌های فاصله‌مبنا

واریوگرام و شاخص‌های فاصله‌مبنا از جمله ابزارهای آنالیزهای مکانی به‌شمار می‌آیند. واریوگرام اجازه بررسی وجود خودهمبستگی مکانی بین اندازه داده‌ها را فراهم می‌کند، و نه خود آنها را (Reimann et al., 2008). خودهمبستگی مکانی به معنی شباهت بیشتر اشیای نزدیک به هم است (Reimann et al., 2008). واریوگرام، مربع اختلاف بین اندازه هر جفت داده مکانی را روی محور  $Y$ ، و فاصله موقعیت آنها را روی محور  $X$  نشان می‌دهد. نیم‌واریانس<sup>۸</sup> به ازای فواصل مختلف از رابطه (۱) به دست می‌آید:

رابطه (۱)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_{i+1})\}^2$$

در رابطه مذکور،  $h$  فاصله بین دو نقطه و  $n$  تعداد زوج نقاطی است که در فاصله  $h$  از هم قرار دارند و  $z(x)$  مقدار داده مکانی در نقطه  $x$  را مشخص می‌کند. دامنه<sup>۹</sup> واریوگرام، روی محور  $X$  از صفر تا جایی که نمودار افقی گردد تعریف می‌شود؛ و این فاصله‌ای را مشخص می‌کند که اندازه داده‌ها در آن دارای خودهمبستگی‌اند. هر چه دامنه واریوگرام بیشتر باشد، مقادیر داده‌ها در فواصل بیشتری دارای خودهمبستگی خواهند بود. Sill بیشترین نیم‌واریانس را روی محور  $Y$  (که نمودار افقی می‌شود) نشان می‌دهد.

برای آنالیز تناوب منطقه‌ای و شناسایی الگوی زمانی - مکانی<sup>۱</sup> بارش باران در حوزه آبخیز رودخانه Pearl ارائه کردند و برای این کار، روش L-moment و تست‌های آماری پیشرفته‌ای مانند تست ایستایی<sup>۲</sup> را به کار بردند. یوما و همکاران (Ueema et al., 2008) با استفاده از پوشش خاک و آنالیزهای آماری، به بررسی الگوی مکانی<sup>۳</sup> چشم‌انداز<sup>۴</sup> پرداختند.

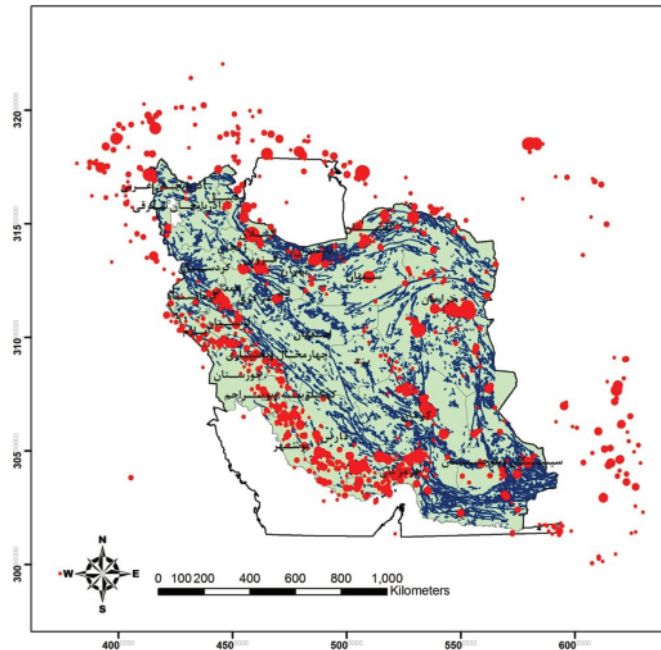
در این مقاله تعدادی از آنالیزهای مکانی بر روی داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر در ایران از سال ۱۹۵۰ تا سال ۲۰۱۰ انجام شده است. ابتدا نحوه توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از هیستوگرام فراوانی بزرگی آنها، روندهای مکانی در بزرگی زمین‌لرزه‌ها، واریوگرام<sup>۵</sup> بزرگی آنها و شاخص‌های فاصله‌مبنا بررسی خواهند شد. سپس نحوه توزیع زمانی زمین‌لرزه‌ها و رابطه بین گسل‌ها و فراوانی زمین‌لرزه‌ها مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. نتیجه هر یک از آنالیزهای مذکور در بخش نتایج درج گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- داده‌ها و نرم‌افزار مورد استفاده

اطلاعات مربوط به بزرگی و زمان وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران، به‌منظور استفاده در این تحقیق، از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ([www.iiees.ac.ir](http://www.iiees.ac.ir)) برگرفته شده‌اند. این زمین‌لرزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به سیستم مختصات مخروطی لامبرت<sup>۶</sup> منتقل گشتند. نقشه‌های مربوط به گسل‌های ایران نیز از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه گردیدند و به سیستم مختصات مذکور انتقال یافتند. به‌منظور اجرای آنالیزهای مکانی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. شکل ۱ زمین‌لرزه‌های تاریخی مورد نظر در این تحقیق را نشان می‌دهد. بزرگی<sup>۷</sup> زمین‌لرزه‌ها با استفاده از اندازه‌های مختلف

1. Spatio-Temporal
2. Stationarity Test
3. Spatial Pattern
4. Landscape
5. (Semi) Variogram
6. Lambert Conformal Conic Projection
7. Magnitude
8. Semivariance
9. Range



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه: زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر در سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ و گسل‌های منطقه

شده است و هر چه مقدار واقعی این شاخص از مقدار مورد انتظار کمتر باشد، خودهمبستگی بین داده‌ها بیشتر است. شاخص General G امکان بررسی کمی وجود خودهمبستگی بین مقادیر داده‌های مکانی را با استفاده از رابطه (۲) فراهم می‌کند:

رابطه (۲)

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_i Z_j}, \forall j \neq i$$

در رابطه مذکور  $Z_i$  و  $Z_j$  مقادیر مربوط به دو نقطه  $i$  و  $j$  را مشخص می‌کنند و  $w_{ij}$  معکوس مربع فاصله بین این دو نقطه است. در واقع این شاخص خوشه‌ای بودن داده‌ها را با در نظر گرفتن بزرگی آنها بررسی می‌کند (O'Sullivan & Unwin, 2003). براساس رابطه (۲) هر چه نقاط با مقادیر عددی بزرگ به هم نزدیک‌تر باشند، مقدار شاخص مربوط به آن افزایش می‌یابد و هر چه

Nugget اختلاف نقطه شروع واریوگرام تا صفر روی محور  $Y$  است که به عنوان نویز یا مؤلفه تصادفی در بررسی خودهمبستگی در نظر گرفته می‌شود (Reimann et al., 2008). هر چه اختلاف Sill و Nugget بیشتر باشد، خودهمبستگی بین مقادیر داده‌ها قوی‌تر خواهد بود.

شاخص‌های اندازه‌گیری الگوهای نقطه‌ای به دو دسته تراکم‌مبنا و فاصله‌مبنا تقسیم می‌شوند (O'Sullivan & Unwin, 2003). از جمله شاخص‌های فاصله‌مبنا می‌توان به این موارد اشاره کرد: میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه<sup>۱</sup>، General G و  $K(d)$  (O'Sullivan & Unwin, 2003). برای تعیین شاخص میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه، فاصله هر نقطه تا نزدیک‌ترین همسایه‌اش به دست می‌آید و سپس میانگین گرفته می‌شود. این مقدار با مقدار مورد انتظار برای این شاخص  $\frac{\sqrt{a}}{(2\sqrt{n})}$  مقایسه می‌شود که در آن  $a$  مساحت منطقه و  $n$  تعداد کل نقاط است. مقدار مورد انتظار براساس تصادفی بودن داده‌ها تعریف

1. Average Distance to Nearest Neighbor

و مورد انتظار برای این شاخص در فواصل مختلف (به ازای dهای مختلف) محاسبه شود، دو نمودار براساس فاصله به دست می‌آید. در صورتی که نمودار مربوط به مقادیر واقعی در بالای نمودار مربوط به مقادیر مورد انتظار قرار بگیرد، توزیع داده‌ها از الگوی خوشه‌ای تبعیت می‌کند.

از شاخص Global Moran's I نیز برای بررسی خوشه‌ای بودن بزرگی زمین‌لرزه‌ها استفاده می‌شود (Lloyd, 2007). مقدار این شاخص از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2}, \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}$$

در رابطه مذکور Z بیانگر مقدار نقاط است، n تعداد کل نقاط را نشان می‌دهد، و  $w_{ij}$  مربع معکوس فاصله بین دو نقطه است. این شاخص نیز در صورتی که نقاط با مقادیر بزرگ نزدیک هم و دور از نقاط با مقدار قرار کوچک گرفته باشند، دارای مقدار بزرگ‌تری خواهد بود. اما با استفاده از شاخص Local Moran's I می‌توان خوشه‌های محلی در بین مقادیر داده‌ها را کشف و استخراج کرد (Lloyd, 2007). مقدار این شاخص برای هر نقطه، جداگانه از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

رابطه (۶)

$$I_i = \frac{Z_i - \bar{Z}}{S_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (Z_j - \bar{Z}),$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} - \bar{Z}^2}{n-1}$$

در رابطه (۶)،  $Z_i$  اندازه نقطه‌ای را نشان می‌دهد که مقدار شاخص برای آن محاسبه می‌شود،  $Z'$  میانگین مقدار تمام نقاط است،  $w_{ij}$  مربع معکوس فاصله بین دو نقطه، و n تعداد نقاط است. در صورتی که مقدار یک نقطه به مقدار نقاطی که در مجاورت آن قرار دارند نزدیک‌تر باشد، این شاخص عدد بزرگ‌تری را به آن

پراکندگی نقاط دارای مقادیر بزرگ در بین نقاط با مقادیر کوچک بیشتر باشد، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد که خود نشان از عدم خودهمبستگی بین اندازه داده‌هاست. همچنین مقدار شاخص  $Z_G$  براساس اختلاف بین شاخص G و مقدار مورد انتظار برای آن، که با فرض تصادفی بودن مقادیر داده‌ها تعریف می‌شود، از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۳)

$$Z_G = \frac{G - E[G]}{\sqrt{V[G]}}, \quad E[G] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{n(n-1)}, \quad \forall j \neq i,$$

$$V[G] = E[G^2] - E[G]^2$$

$Z_G$ -score اختلاف مقدار به دست آمده از رابطه (۲) برای شاخص G را با مقدار مورد انتظار آن تعیین می‌کند. هر چه این مقدار از صفر بیشتر باشد، داده‌ها دارای خودهمبستگی بیشتری خواهند بود.

مزیت شاخص  $K(d)$  این است که فاصله هر زمین‌لرزه را تا تمام زمین‌لرزه‌ها در نظر می‌گیرد (O'Sullivan & Unwin, 2003)؛ اما در این شاخص مقادیر داده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و فقط خوشه‌ای بودن مکان آنها بررسی می‌گردد. مقدار این شاخص برای فاصله d از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

رابطه (۴)

$$k(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w(i,j)}{\pi n(n-1)}}$$

در رابطه مذکور، n تعداد زمین‌لرزه‌هاست و A مساحت محدوده مورد مطالعه است. در صورتی که فاصله دو زمین‌لرزه i و j کمتر از d باشد، مقدار w یک خواهد بود و در غیر این صورت صفر. در صورتی که داده‌ها خوشه‌ای باشند، فاصله آنها کم می‌شود و عبارت صورت کسر در رابطه مذکور افزایش می‌یابد و خود باعث بزرگ شدن مقدار شاخص  $K(d)$  می‌شود. مقدار مورد انتظار این شاخص  $\pi d^2$  است که با فرض تصادفی بودن توزیع داده‌ها به دست آمده است. اگر مقدار واقعی

شده است و در ادامه نیز نتایج تحقیق ارائه گردیده‌اند.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- بررسی نحوه توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها

##### ۳-۱-۱- بررسی فراوانی بزرگی زمین‌لرزه‌ها

مجموعه داده‌ها از نظر نحوه توزیع و وجود روندهای کلی<sup>۱</sup> و محلی<sup>۲</sup> بررسی شدند (Reimann et al., 2008). بدین منظور هیستوگرام زمین‌لرزه‌ها براساس بزرگی آنها در ۱۰ کلاس رسم شد (شکل ۳). فراوانی زمین‌لرزه‌های هر کلاس به وسیله ارتفاع میله مشخص گردیده است. این هیستوگرام نشان می‌دهد که تعداد زمین‌لرزه‌های بزرگ کمتر از زمین‌لرزه‌های خفیف است.

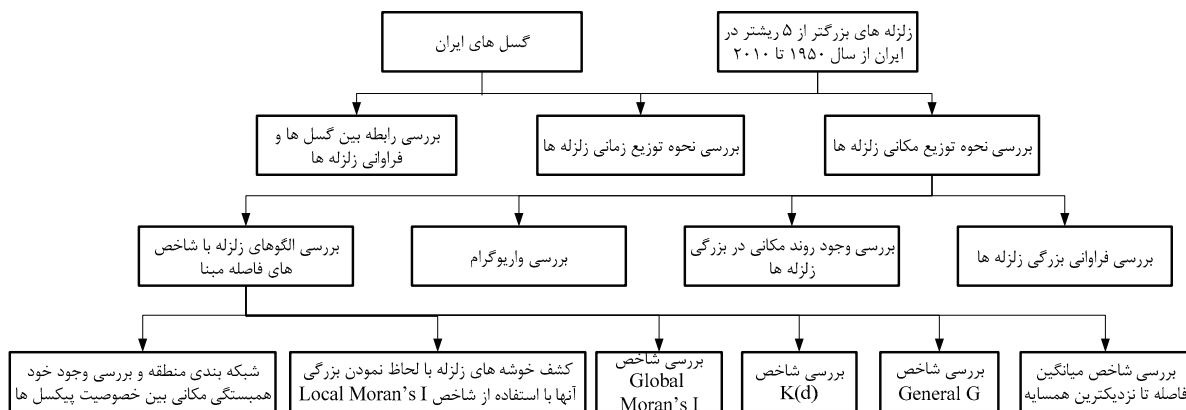
نقطه نسبت می‌دهد که نشان از همبستگی مقدار آن نقطه با همسایه‌هایش دارد. در رابطه (۷) مقدار استاندارد شده این شاخص که اختلاف آن را با مقدار مورد انتظار آن برآورد می‌کند محاسبه می‌شود. هر چه  $Z_{I_i}$  - score بزرگ‌تر باشد، اختلاف مقدار واقعی و مقدار مورد انتظار فزون‌تر، و خودهمبستگی در آن نقطه بیشتر است.

رابطه (۷)

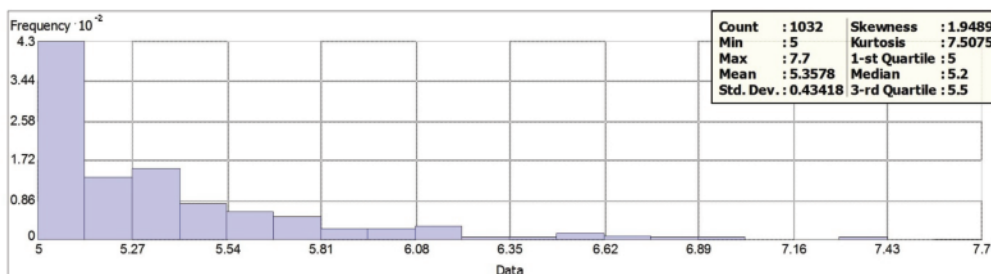
$$Z_{I_i} = \left( \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}} \right), E[I_i] = - \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}}{n-1},$$

$$V[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2$$

روند کلی اجرای پژوهش در شکل ۲ نشان داده



شکل ۲. روند کلی اجرای پژوهش

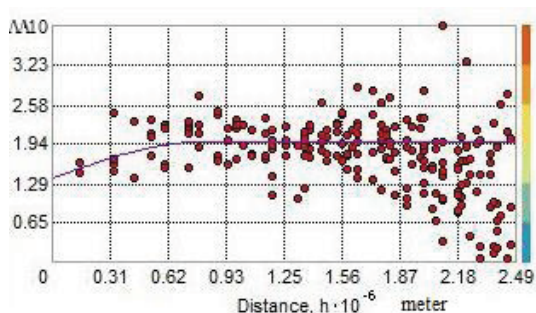


شکل ۳. هیستوگرام توزیع زمین‌لرزه‌ها براساس بزرگی آنها

1. Global Trend
2. Local Trend



اختلاف بزرگی بین آنها یا همان نیم‌واریانس ندارد. به عبارت ساده‌تر، چنانچه زمین‌لرزه‌های بزرگ در محلی رخ داده باشد، دلیل قطعی بر بزرگ بودن بقیه زمین‌لرزه‌های حوالی آن نیست. به منظور بررسی جهتی بودن<sup>۲</sup> واریوگرام (Reimann et al., 2008)، این نمودار در دو جهت شمالی - جنوبی و شرقی - غربی رسم شد. نتایج بررسی نشان از آن داشتند که دو نمودار به دست آمده شبیه به یکدیگرند و تفاوتی بین واریوگرام‌ها وجود ندارد.



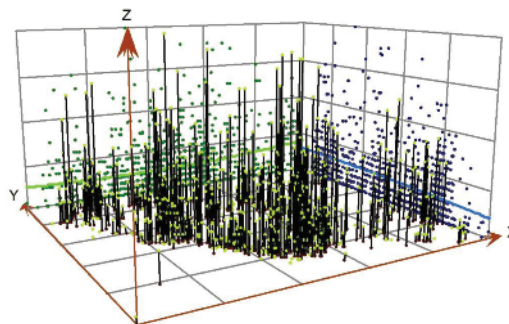
شکل ۵. واریوگرام بزرگی زمین‌لرزه‌ها

### ۳-۱-۴- بررسی الگوهای زمین‌لرزه با شاخص‌های فاصله‌مبنا

برای تعیین شاخص میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه، فاصله هر زمین‌لرزه تا نزدیک‌ترین همسایه آن به دست آمد و سپس میانگین گرفته شد. این مقدار با مقدار مورد انتظار برای این شاخص مقایسه شد. نتیجه این آزمایش نشان داد احتمال اینکه مقدار واقعی این شاخص کوچک‌تر از مقدار مورد انتظار آن باشد، برابر با ۹۹ درصد است؛ یعنی زمین‌لرزه‌ها بسیار نزدیک به هم‌اند و از الگوی خوشه‌ای تبعیت می‌کنند. شاخص General G خوشه‌ای بودن زمین‌لرزه‌ها را با در نظر گرفتن بزرگی آنها بررسی می‌کند (O'Sullivan & Unwin, 2003). براساس رابطه (۲) هر چه زمین‌لرزه‌های بزرگ به هم نزدیک‌تر باشند، مقدار

### ۳-۱-۲- بررسی وجود روند مکانی در بزرگی زمین‌لرزه‌ها

برای بررسی وجود روند کلی در بین زمین‌لرزه‌ها، آنها در سیستم مختصاتی سه‌بعدی ترسیم شدند که دو محور آن مربوط به مختصات زمین‌لرزه‌هاست و محور سوم نیز بزرگی آنها را نشان می‌دهد (شکل ۴). سپس میله‌ها یک بار روی صفحه YZ و یک بار روی صفحه XZ تصویر شدند و یک منحنی به نقاط موجود در هر صفحه برازش داده شد که نتیجه آن با خطوط آبی و سبز در شکل ۴ مشخص گردیده است. هر دو خط یادشده تقریباً افقی هستند؛ یعنی روند قابل تشخیصی در زمین‌لرزه‌ها وجود ندارد. به عبارت دیگر، با حرکت از یک طرف کشور به طرف دیگر آن، روندی خاص در بزرگی زمین‌لرزه‌ها دیده نمی‌شود.



شکل ۴. نمودار سه‌بعدی زمین‌لرزه‌ها براساس بزرگی آنها به منظور بررسی روند کلی

### ۳-۱-۳- بررسی واریوگرام

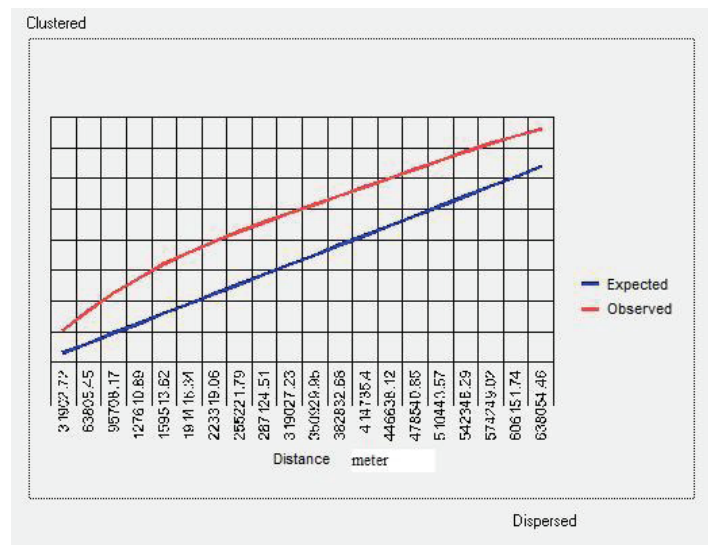
واریوگرام بزرگی زمین‌لرزه‌ها براساس رابطه (۱) در شکل ۵ رسم شده است. نقاط موجود در این شکل نیم‌واریانس بزرگی زمین‌لرزه‌ها را در فواصل مختلف نشان می‌دهند. با برازش مدل کروی<sup>۱</sup> بر واریوگرام، دامنه آن ۸۱۳ کیلومتر، Nugget برابر با ۰/۱۳۶۹ و Sill برابر با ۰/۱۹۵ به دست آمد. با توجه به نزدیک بودن مقادیر Nugget و Sill می‌توان نتیجه گرفت که در دامنه به دست آمده از واریوگرام، خودهمبستگی کم است و نویز زیادی هم وجود دارد. به عبارت دیگر، افزایش فاصله مکانی بین زمین‌لرزه‌ها تأثیر چندانی در

1. Spherical  
2. Isotropic



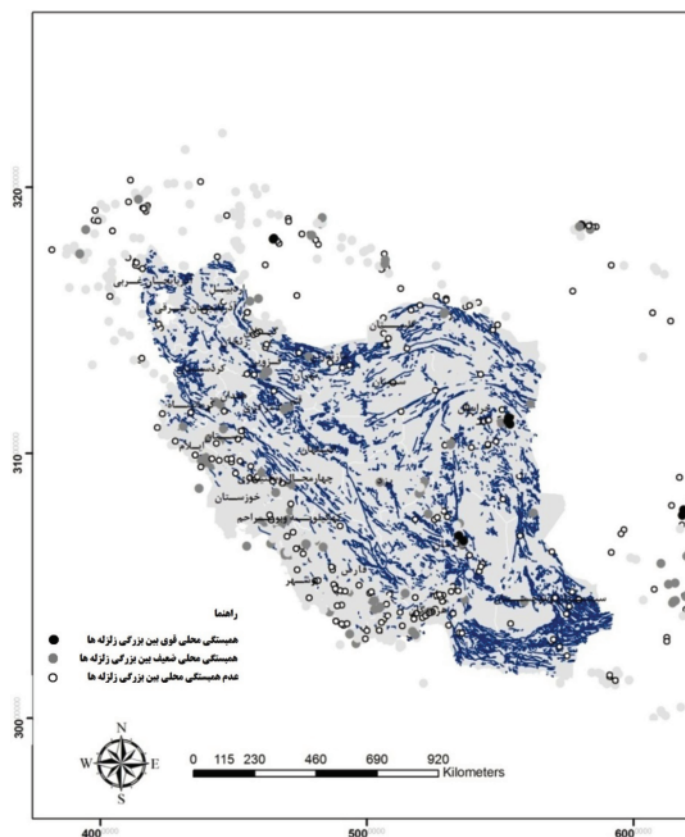
خوشه‌های زمین‌لرزه در آنها بارز است و در واقع آنها زلزله‌خیز محسوب می‌شوند. در مقابل مناطقی وجود دارند که پدیده زمین‌لرزه در آنها کمتر است و در نتیجه مناطق امن‌تری هستند. از شاخص  $I$  Moran's Global نیز برای بررسی خوشه‌ای بودن بزرگی زمین‌لرزه‌ها استفاده شد. مقدار این شاخص از رابطه (۵) برابر با  $0.34$  - به دست آمد. نزدیک بودن این عدد به صفر نشان می‌دهد که توزیع مکانی بزرگی زمین‌لرزه‌ها از الگوی خوشه‌ای<sup>۱</sup> تبعیت نمی‌کند و با آزمایش‌های پیشین هم‌سویی و توافق دارد. اما با استفاده از شاخص  $I$  Moran's Local خوشه‌های محلی در بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها که ناچیزند کشف و استخراج شدند (Lloyd, 2007). مقدار این شاخص برای هر زمین‌لرزه به طور جداگانه از رابطه (۶) محاسبه شد. در شکل ۷ مقدار  $Z_i$  - score برای این شاخص با درجات مختلف خاکستری برای هر زمین‌لرزه به صورت محلی نشان داده شده است. هر چه این عدد بزرگ‌تر باشد، نقاط تیره‌تر می‌شوند؛ یعنی همبستگی محلی بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها بیشتر است (رابطه ۷).

شاخص مربوط افزایش می‌یابد؛ و هر چه پراکندگی زمین‌لرزه‌های بزرگ در بین زمین‌لرزه‌های کوچک بیشتر باشد، مقدار این شاخص کاهش می‌یابد، که بیانگر عدم خودهمبستگی بزرگی زلزله‌هاست. سپس  $Z_G$ -score از رابطه (۳) محاسبه شد. نتیجه این آزمایش نشان داد که مقدار عددی شاخص  $G$  صفر،  $Z_G$ -score برابر  $0.18$  - است که نتیجه بررسی واریوگرام را تأیید می‌کند و در واقع نشان می‌دهد که توزیع بزرگی زمین‌لرزه‌ها تصادفی است. مقدار واقعی شاخص  $K(d)$  به ازای فواصل مختلف از رابطه (۴) محاسبه شده و به همراه مقادیر مورد انتظار آن در شکل ۶ درج گردیده است. نمودار آبی (نمودار پایینی)، مقادیر مورد انتظار و نمودار قرمز (نمودار بالایی) مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهند. از آنجا که مقادیر واقعی بیش از مقادیر مورد انتظار این شاخص هستند، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع زمین‌لرزه‌ها به صورت خوشه‌ای است. بدین ترتیب، این شاخص نیز نتیجه شاخص میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه را تأیید می‌کند و می‌توان گفت که خطر زمین‌لرزه نقطه‌ای نیست، بلکه می‌تواند ناحیه‌ای را دربرگیرد. به عبارت دیگر، مناطقی وجود دارند که



شکل ۶. نمودار شاخص  $K(d)$  برای زمین‌لرزه‌ها

## 1. Clustering Pattern

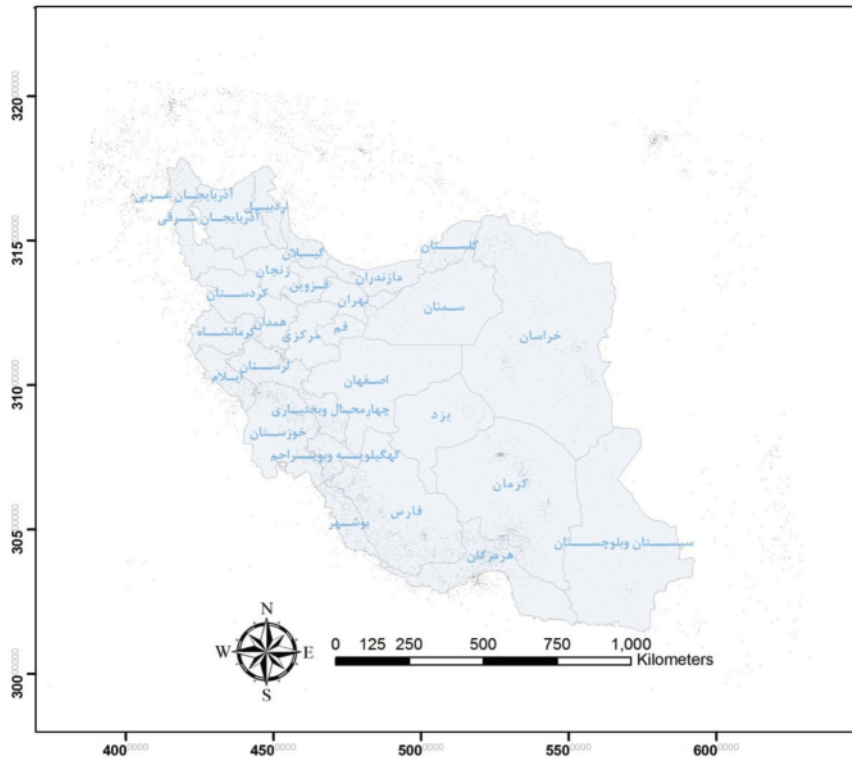


شکل ۷. استخراج خوشه‌های محلی زمین‌لرزه‌ها با در نظر گرفتن بزرگی آنها با استفاده از شاخص Local Moran's I

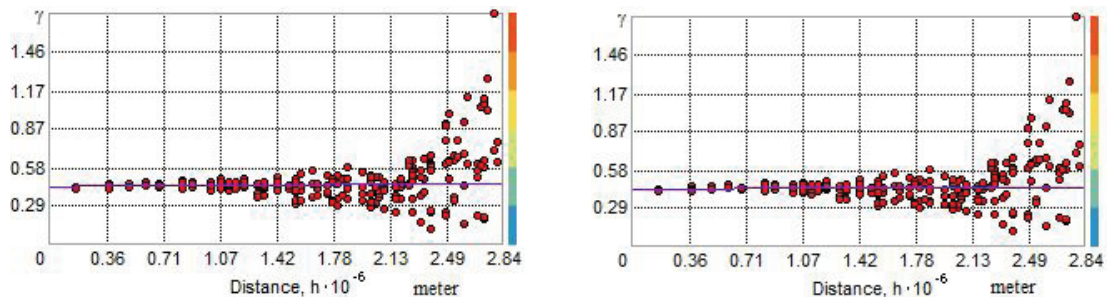
هر دو واریوگرام، خودهمبستگی محسوس و قابل تشخیصی دیده نمی‌شود. بنابراین نظریه فقدان خودهمبستگی قابل اعتماد، بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها تأیید می‌شود. اکنون این موضوع که در منطقه مورد مطالعه زمین‌لرزه‌های بزرگ در کنار هم قرار ندارند و به طور تصادفی در میان زمین‌لرزه‌های خفیف توزیع شده‌اند، با قاطعیت بیشتری جلوه می‌کند. بررسی شکل ۹ مشخص می‌سازد که مقدار نیم‌واریانس‌ها بعد از فاصله ۲۵۰۰ کیلومتری تغییراتی را نشان می‌دهد که نشان از کاهش مقدار خودهمبستگی در بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها دارد. به عبارت دیگر، بعد از فاصله ۲۵۰۰ کیلومتری شباهت بین بزرگی زمین‌لرزه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که در صورت بررسی زمین‌لرزه‌ها در محدوده‌ای بزرگ‌تر ممکن است نتایج متفاوتی به دست آید.

به منظور اطمینان از فقدان خودهمبستگی بین بزرگی زلزله‌ها، محدوده مورد مطالعه به شبکه‌های یک کیلومتری تقسیم‌بندی شد، سپس با در نظر گرفتن تمام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۲/۵ ریشتر که در ۶۰ سال اخیر در محدوده مورد مطالعه رخ داده‌اند، در هر قسمت بزرگ‌ترین زمین‌لرزه و میانگین بزرگی آنها تعیین شد. در شکل ۸ این شبکه‌بندی نشان داده شده است. در این شکل تعداد نقاط سیاه‌رنگ کم است و بیشتر مناطق سفید هستند. علت این است که، همان گونه که پیش‌تر نیز نشان داده شد، زمین‌لرزه‌ها خوشه‌ای‌اند و در برخی از مناطق متراکم‌اند و در برخی دیگر نیز کمتر. مناطق سفیدرنگ فاقد زمین‌لرزه‌های تاریخی بوده‌اند. واریوگرام مربوط به هر دو داده این شبکه در شکل ۹ آورده شده است. واریوگرام سمت چپ مربوط به داده بزرگ‌ترین زمین‌لرزه، و واریوگرام سمت راست مربوط به داده میانگین بزرگی‌هاست. در

بررسی الگوهای زمانی- مکانی در داده‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های تاریخی ایران، با استفاده از شاخص‌ها و مدل‌های آمار فضایی



شکل ۸. شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه در پیکسل‌های یک کیلومتری و تعیین بزرگ‌ترین زلزله و میانگین بزرگی‌ها برای هر پیکسل

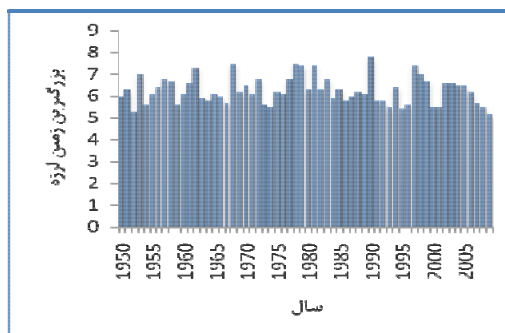
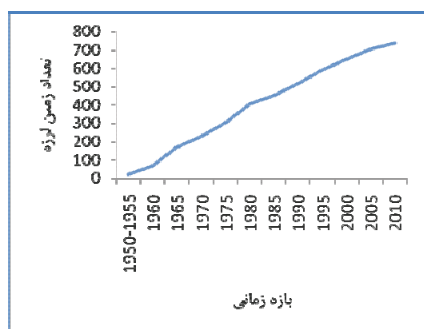


شکل ۹. واریوگرام مربوط به خصوصیت بزرگ‌ترین زمین‌لرزه (سمت چپ)، و واریوگرام مربوط به خصوصیت میانگین بزرگی‌ها (سمت راست) برای شبکه تولید شده

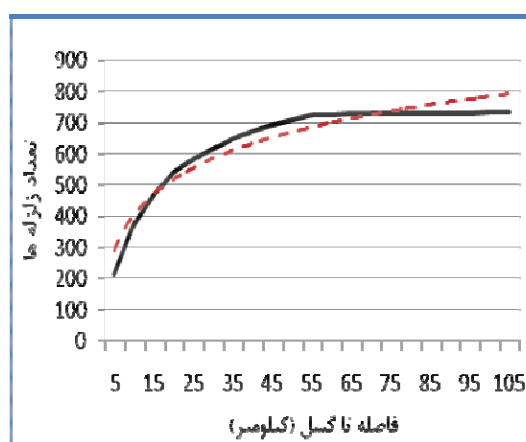
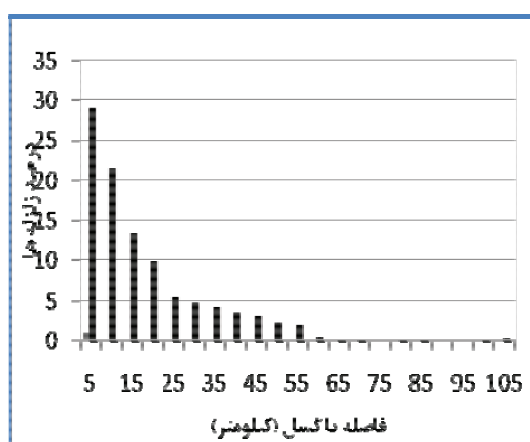
### ۳-۲- بررسی نحوه توزیع زمانی زمین‌لرزه‌ها

برای بررسی نحوه توزیع زمانی زمین‌لرزه‌ها، فقط آنهایی در نظر گرفته شدند که در داخل ایران قرار دارند. تعداد کل این زمین‌لرزه‌ها با بزرگی بیش از ۵ ریشتر از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ برابر با ۷۳۴ زمین‌لرزه بوده است. در شکل ۱۰ نمودار فراوانی تجمعی این زمین‌لرزه‌ها در بازه‌های زمانی ۵ ساله در سمت چپ، و نمودار میله‌ای مربوط به بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در هر سال در سمت

راست نشان داده شده است. نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها براساس زمان تقریباً خطی است و نشان می‌دهد که گذر زمان تأثیر چندانی بر تعداد زمین‌لرزه‌ها نداشته و آنها پدیده‌ای با توزیع زمانی یکسان بوده‌اند. به علاوه، نمودار مربوط به بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در هر سال نیز نشان از تغییرات چندانی ندارد؛ یعنی زمین‌لرزه‌های بزرگ به صورت پیوسته و دائمی در کشور رخ داده‌اند.



شکل ۱۰. سمت چپ، فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها در بازه‌های زمانی ۵ ساله. سمت راست، بزرگ‌ترین زمین لرزه در هر سال



شکل ۱۱. سمت راست، فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها در فواصل مختلف از گسل‌ها. سمت چپ، درصدی از زمین لرزه‌ها که در فواصل مختلف از گسل‌ها اتفاق افتاده‌اند.

شکل ۱۰، سمت چپ، درصدی از زمین لرزه‌ها که در فواصل مختلف از گسل رخ داده‌اند، نشان داده شده است. جالب توجه است که ۹۰ درصد زمین لرزه‌های تاریخی ایران در فاصله کمتر از ۴۰ کیلومتری گسل‌ها اتفاق افتاده‌اند و این فاصله پرخطرترین ناحیه از نظر زمین لرزه‌خیزی محسوب می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه زمین لرزه‌ها در بسیاری از نقاط جهان و از جمله ایران در زمرهٔ مرگبارترین حوادث هستند، آنالیزهای مکانی - زمانی بر روی آنها می‌توانند موجب کشف الگوها و فرایندهای موجود بین داده‌ها شود و در برنامه‌ریزی برای کاهش تلفات زمین لرزه بس یاری‌رسان

#### ۳-۳- بررسی رابطه بین گسل‌ها و فراوانی زمین لرزه‌ها

در این بررسی نیز فقط زمین لرزه‌های رخ داده در داخل ایران در نظر گرفته شده‌اند چون فقط گسل‌های موجود در داخل ایران در دسترس هستند. نمودار فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها براساس فاصله از گسل در شکل ۱۱، سمت راست با خط ممتد نشان داده شده است. خط چین، نمودار لگاریتمی را نشان می‌دهد. از مقایسه این دو خط معلوم می‌شود که نمودار فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها براساس فاصله تا گسل، لگاریتمی است؛ یعنی همان گونه که انتظار می‌رفت، بیشتر زمین لرزه‌ها در مجاورت گسل‌ها رخ داده‌اند و در واقع با دور شدن از گسل‌ها احتمال وقوع زمین لرزه نیز کاهش می‌یابد. در

زمانی نباید از آن غافل شد. همچنین بررسی نمودار بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در سال‌های مختلف نشان داد که اینها در هیچ سالی تغییر ناگهانی نداشته‌اند و زمین‌لرزه‌های بزرگ در تمام سال‌ها خسارات عمده‌ای را در مناطق مختلف کشور به بار آورده‌اند.

در نهایت با بررسی مکان زمین‌لرزه‌ها نسبت به گسل‌ها، مشخص شد که رابطه‌ای لگاریتمی بین فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها براساس فاصله از گسل وجود دارد و ۹۰ درصد این زمین‌لرزه‌ها در فاصله کمتر از ۴۰ کیلومتری گسل‌ها رخ داده‌اند؛ و این ناحیه می‌تواند به عنوان ناحیه پرخطر گسل‌ها در نظر گرفته شود.

در این مقاله، خوشه‌ای بودن زمین‌لرزه‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت و کوشش شد که نقش عواملی چون گسل و زمان در پیدایش خوشه‌های زمین‌لرزه بررسی شود. همان‌طور که بررسی شکل ۹ نشان داد، با انجام آنالیزهای مکانی بر روی زمین‌لرزه‌ها در محدوده‌ای وسیع‌تر مانند قاره، چه‌بسا نتایج متفاوتی به دست آید. نتایج این تحقیق در مورد خوشه‌ای بودن زمین‌لرزه‌ها و نقش عواملی مانند گسل و زمان در پیدایش خوشه‌های زمین‌لرزه می‌تواند در تعیین مناطق خطرناک در برابر زمین‌لرزه، پهنه‌بندی لرزه‌ای، بررسی روندهای زمانی و پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

##### ۵- منابع

Alberti, M., 2006, **Spatial Structures in Earthquakes and Faults: Quantifying Similarity in Simulated Stress Fields and Natural Data Sets**, Journal of Structural Geology, 28, 998-1018.

Chang, K.T., Chiang, S.H., & Hsu, M.L., 2007, **Modeling Typhoon and Earthquake - induced Landslides in a Mountainous Watershed Using Logistic Regression**, Geomorphology, 89, 335-347.

باشد. در بخش نخست این مقاله نحوه توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها و وجود خودهمبستگی بین آنها بررسی شد. شاخص‌های میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین همسایه و  $K(d)$  نشان دادند که زمین‌لرزه‌ها خوشه‌ای‌اند و خودهمبسته. نمودار واریوگرام و شاخص‌های  $G$  و  $I$  Moran's Clobal نشان دادند که بزرگی زمین‌لرزه‌ها در کل، خودهمبسته نیست؛ یعنی زمین‌لرزه‌های بزرگ یا خفیف خوشه‌ای نیستند. به عبارت دیگر، مناطقی که در طول زمان با زمین‌لرزه‌های خفیف مواجه بوده‌اند، دچار زمین‌لرزه‌های بزرگ نیز شده‌اند. ضمناً محدوده‌های خطر، نقطه‌ای نیستند و به صورت مناطقی که خوشه‌هایی از زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ در آنها قرار دارند قابل تشخیص‌اند. بنابراین می‌توان خوشه‌های زمین‌لرزه را دقیق‌تر بررسی کرد و تمهیدات لازم را برای رویارویی با زمین‌لرزه‌های بزرگ در هر منطقه فراهم ساخت.

نتایج تحقیقات پروژه جایکا (JICA, 2000) که به بررسی احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای بزرگ در تهران و خسارات احتمالی ناشی از آن پرداخته، نشان داده است که گسل مشا در شمال تهران محتمل‌ترین گسل برای تولید زمین‌لرزه‌ای بزرگ در منطقه است. این نتیجه براساس مطالعات زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی شکل گرفته و تکوین یافته بود و نه براساس تحلیل‌های آماری. حال آنکه این گسل سال‌هاست که فقط زمین‌لرزه‌های خفیفی را به طور مداوم تولید می‌کند و زمین‌لرزه بزرگی را باعث نشده‌اند. این امر می‌تواند تأییدی بر نتایج این تحقیق باشد، زیرا این نتایج نیز نشان می‌دهند که خود زمین‌لرزه‌ها همبسته‌اند ولی بزرگی آنها همبسته نیست. به عبارت دیگر، گسل مشا که فعالیت پیوسته و خفیفی داشته است می‌تواند منجر به تولید زمین‌لرزه‌های بزرگی در آینده شود.

بررسی نمودار فراوانی تجمعی این بلایای طبیعی براساس زمان نشان داد که زمین‌لرزه پدیده‌ای است که همواره انسان و محیط را تهدید می‌کند و در هیچ بازه

- Deng, Y., Chen, X., Chuvieco, E., Warner, T., & Wilson, J.P., 2007, **Multi-scale Linkages between Topographic Attributes and Vegetation Indices in a Mountainous Landscape**, Remote Sensing of Environment, 111, 122–134.
- Diggle, P.J., & Jr., P.J., 2007, **Model-based Geostatistics**, New York: Springer.
- Fenga, Q., Liub, Y., & Mikami, M., 2004, **Geostatistical Analysis of Soil Moisture Variability in Grassland**, Journal of Arid Environments, 58, 357–372.
- Gallousi, C., & Koukouvelas, I.K., 2007, **Quantifying Geomorphic Evolution of Earthquake-triggered Landslides and Their Relation to Active Normal Faults**, An example from the Gulf of Corinth, Greece. Tectonophysics, 440, 85–104.
- Handmer, J., & Dovers, S., 2007, **Handbook of Disaster and Emergency Policies and Institutions**, Earthscan Publications.
- Hashemi, M., & Alesheikh, A.A., 2010, **Developing an Agent Based Simulation Model for Earthquakes in the Context of SDI**, GSDI12. Garden city, Singapore.
- Japan International Cooperation Agency (JICA) & Center for Earthquake and Environmental Studies of Tehran (CEST) & Tehran Municipality, 2000, **The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran area in the Islamic Republic of Iran**, Final report.
- Jinhui, Y., Jie, C., XiWei, X., Xulong, W., & Yonggang, Z., 2010, **The Characteristics of the Landslides Triggered by the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake from Anxian to Beichuan**, Journal of Asian Earth Sciences, 37, 452–459.
- Kamp, U., Growley, B.J., Khattak, G.A., & Owen, L.A., 2008, **GIS-based Landslide Susceptibility Mapping for the 2005 Kashmir Earthquake Region**, Geomorphology, 101, 631–642.
- Khazai, B., & Sitar, N., 2003, **Evaluation of Factors Controlling Earthquake-induced Landslides Caused by Chi-Chi Earthquake and Comparison with the Northridge and Loma Prieta Events**, Engineering Geology, 71, 79–95.
- Lloyd, C.D., 2007, **Local Models for Spatial Analysis**, CRC.
- Luzi, L., & Pergalani, F., 2000, **A Correlation Between Slope Failures and Accelerometric Parameters: the 26 September 1997 Earthquake (Umbria-Marche, Italy)**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, 301-313.
- Martini, P.D., Hessami, K., Pantosti, D., D'Addezio, G., Alinaghi, H., & Ghafory-Ashtiani, M., 1998, **A Geologic Contribution to the Evaluation of the Seismic Potential of the Kahrizak Fault (Tehran, Iran)**. Tectonophysics, 287, 187- 199.
- Matheron, G., 1963, **Principles of Geostatistics**, Economic Geology, 58, 1246–1266.
- O'Sullivan, D., & Unwin, D., 2003, **Geographic Information Analysis**, New Jersey: Wiley.



- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., & Dutter, R., 2008, **Statistical Data Analysis Explained**, Wiley.
- Rosea, A., & Lim, D., 2002, **Business Interruption Losses From Natural Hazards: Conceptual and Methodological Issues in the Case of the Northridge Earthquake**, *Environmental Hazards*, 4, 1-14.
- Sassa, K., 2005, **Landslides: Risk analysis and sustainable disaster management**, Springer.
- Shabestari, K.T., Yamazakib, F., Saitaa, J., & Matsuoka, M., 2004, **Estimation of the Spatial Distribution of Ground Motion Parameters for Two Recent Earthquakes in Japan**, *Tectonophysics*, 390, 193-204.
- Uuema, E., Roosaare, J., Kanal, A., & Mander, U., 2008, **Spatial Correlograms of Soil Cover as an Indicator of Landscape Heterogeneity**, *Ecological Indicators*, 8, 783-794.
- Yang, T., Shao, Q., Hao, Z.C., Chen, X., Zhang, Z., Xu, C.Y. et al., 2010, **Regional Frequency Analysis and Spatio-temporal Pattern Characterization of Rainfall Extremes in the Pearl River Basin, China**, *Journal of Hydrology*, 380, 386-405.