

## امکان سنجی پیش‌بینی زلزله ۱۳۹۱ اهر - ورزقان، آذربایجان با کاربرد الگوریتم ناحیه - زمان - طول

حمید زعفرانی (نویسنده مسؤل)، استادیار پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،  
E-mail: h.zafarani@iiees.ac.ir  
سید محمد مهدی غفوری، دانشجوی دکترای سازه، دانشکده فنی - مهندسی دانشگاه قم

**چکیده:** بررسی روند وقوع زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد در اکثر موارد فعالیت‌های پیش‌آگاهی‌دهنده، قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. از جمله پیش‌آگاهی‌دهنده‌ها، پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای هستند و مزیت عمده آنها گستره وسیع مکانی و زمانی می‌باشد که قابلیت رؤیت در فواصل دور را امکان‌پذیر می‌سازد. از معتبرترین الگوریتم‌های پیش‌نشانگر لرزه‌ای، الگوریتم *RTL*\* است. پارامتر آماری *RTL* در واقع مرحله سکوت و فعال‌سازی لرزه‌ای را به شکل فیزیکی قابل‌قبولی به فرمول (رابطه) تبدیل کرده و کمیت‌های وزنی مرتبط با سه پارامتر (زمان، مکان و بزرگی) زلزله را بیان می‌نماید. در این مقاله، روش *RTL* به منظور بررسی امکان‌پذیری پیش‌بینی زلزله اهر - ورزقان به کار گرفته می‌شود. زلزله اهر - ورزقان آذربایجان به دلیل رخداد در دو سال اخیر از سابقه لرزه‌خیزی ثبت شده مناسبی برخوردار بوده است. به منظور بررسی روش آماری *RTL* در زلزله اهر ورزقان، ابتدا حد کامل بودن کاتالوگ با گذشت زمان تعیین و سپس الگوریتم فوق در نرم‌افزار *Matlab* پیاده‌سازی شده است. نتایج تحلیل در مورد زلزله اهر - ورزقان به روشنی نشان می‌دهد مقدار *RTL* در دو سال قبل از زلزله کاهش یافته است. در تفسیر نتایج *RTL* باید به یاد داشت هنوز در سطح دنیا کاهش یا افزایش فعالیت پیش‌لرزه‌ای مورد مناقشه است.

**کلیدواژه‌ها:** الگوریتم *RTL*، الگوهای لرزه‌ای، پیش‌بینی میان‌مدت زلزله، اهر، ایران

### ۱- مقدمه

این طریق چندان میسر نشده است. اما بررسی‌های صورت گرفته بر روی روند وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ نشان می‌دهد که در اکثر موارد، فعالیت‌های پیش‌نشانگری قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. پیش‌نشانگرها و پیش‌آگاهی‌دهنده‌های زلزله انواع مختلفی دارند که از آن میان، پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای مزیت‌های فراوانی نسبت به سایر پیش‌آگاهی‌دهنده‌های زلزله دارند. از آن جمله می‌توان به گستره وسیع مکانی و زمانی آنها اشاره کرد که در فواصل دور نیز قابل رویت و رصد کردن می‌باشند. بر این اساس زلزله‌شناسان الگوریتم‌های مختلفی را جهت بررسی تغییرات الگوی لرزه‌خیزی منطقه، طراحی کرده‌اند. از معتبرترین این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم ناحیه - زمان - طول\* که به

توجه به این نکته که به طور میانگین حدود ۳۳ هزار نفر در سال جان خود را بر اثر زلزله از دست می‌دهند موجب شده تا فعالیت‌های پیشگیری برای مقاوم‌سازی سازه‌ها و پیش‌بینی از طریق رصد فعالیت‌های ژئوفیزیکی و تعیین مختصات زمانی و مکانی زلزله محتمل آینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. پیش‌بینی پدیده زلزله که ایجاد آن مبتنی بر رفتار دینامیکی پیچیده در اعماق لیتوسفر است، تنها بر اساس رؤیت تغییرات در یک پدیده (پیش‌نشانگر)، امکان‌پذیر نیست. اگرچه برخی پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما در بیشتر موارد عدم قطعیت مکانی - زمانی آنها به گونه‌ای بوده که امکان پیش‌بینی‌های عملی از

در سالهای ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ روی داده است. پارامترهای *RTL* نشان می‌دهد هر زلزله با مرحله سکوت یا سکوت‌های قابل توجهی پیش از وقوع آن، همراه بوده است [۳].

تغییرات زمانی پارامتر *RTL* در کانون زلزله کوبه ژاپن (با بزرگای ۷/۲، ۱۷ ژانویه ۱۹۹۵) نیز محاسبه شده‌اند. در این مطالعه نیز، سکوت لرزه‌ای آشکاری با کمک منحنی *RTL* به دست آمده که با مرحله فعالسازی همراه است. این سکوت در سال ۱۹۹۳ آغاز و یک سال بعد به پایان رسید [۳]. استان آذربایجان شرقی که در شمال غربی ایران واقع شده یکی از مناطق با لرزه‌خیزی بالا در کشور می‌باشد. در دوره‌های تاریخی و دستگاهی، تعداد زیادی زلزله در این منطقه به ثبت رسیده است. دو زلزله با بزرگای  $M_w=6/4$  و  $M_w=6/3$  در تاریخ ۱۱ اوت سال ۲۰۱۲ در منطقه اهر-ورزقان به وقوع پیوسته است. این زلزله‌ها باعث شد که ۳۲۷ نفر کشته، بیش از ۲۰ روستا به کلی تخریب و تعداد زیادی خانه در شهرهای اهر و ورزقان در محدوده ۲۰ کیلومتری مرکز زلزله، به شدت آسیب ببینند.

در این مقاله، به منظور مطالعه تغییرات پارامتر *RTL* در زلزله اهر-ورزقان ابتدا زلزله‌هایی که در فاصله ۸۰ کیلومتری از رومرکز زلزله رخ داده‌اند از کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری (*IRSC*) وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از سال ۲۰۰۶ به بعد استخراج شده و سپس کاتالوگ زلزله‌های مربوط؛ همگن و حوادث وابسته حذف می‌شوند. در انتها پارامترهای مربوط به محاسبه *RTL* استخراج و تغییرات *RTL* در طول زمان محاسبه می‌گردد.

## ۲- الگوریتم *RTL*

کاربرد روشهای پیش‌بینی متعدد، در برخی از مناطق لرزه‌ای جهان انجام گرفته و تا حدودی به موفقیت دست یافته است. یکی از روشهای نوین که در دهه اخیر از موفقیت قابل توجهی برخوردار بوده روش *RTL* است که در ادامه به طور ویژه به توصیف آن پرداخته و چگونگی توزیع مکانی این الگوی لرزه‌خیزی بررسی می‌شود.

آزمایش سنگها در مقیاس آزمایشگاهی نشان می‌دهد همزمان با افزایش بارگذاری ممکن است میزان انتشار امواج

اختصار *RTL* نامیده می‌شود، اشاره کرد که در مناطق مختلف لرزه‌ای دنیا مورد آزمون قرار گرفته است. سکوت لرزه‌ای با کاهش تابع *RTL* و فعالیت لرزه‌ای با افزایش در مقدار آن نشان داده می‌شود. بهبودهای مختلفی روی روش حاضر صورت گرفته و از نتایج آن، تفاسیر گوناگون ارائه شده است. به عنوان مثال چن و وو [۱] و هوانگ و ناگو [۲]، هم کاهش و هم افزایش مقدار *RTL* را به عنوان پیش‌نشانگر زلزله در نظر گرفته‌اند؛ اما دیگر محققین (برای مثال هوانگ [۳] و سوبولوف [۴]) فقط کاهش مقدار (سکوت لرزه‌ای) آن را به عنوان یک پیش‌نشانگر قابل اعتماد لحاظ کرده‌اند.

اولین بار محاسبات الگوریتم *RTL* برای سه زلزله پس از سال ۱۹۷۵ با بزرگای بیش از  $M > 4/5$  در شمال ایتالیا (منطقه رجیو امیلیا) توسط جیووامباتیستا و تیوپکین [۵] انجام گرفت. نتیجه کاربرد الگوریتم بر روی داده‌های این سه زلزله نشان می‌دهد مرحله فعالیت لرزه‌ای (وجود پیش-لرزه‌ها) وجود دارد، اما مرحله سکوت لرزه‌ای برای این سه زلزله قابل تشخیص نیست.

محاسبات الگوریتم *RTL* برای زلزله‌های با بزرگای ۵/۶ و ۵/۸ که در تاریخ ۱۹۹۷/۹/۲۶ در مرز دو استان اومبریا و ماری روی داد، توسط دی‌ژیووامباتیستا و تیوپکین [۶] انجام گرفت. در این مطالعه، محققان نشان دادند که سکوت لرزه‌ای در سپتامبر ۱۹۹۶ آغاز شده و پارامتر *RTL* به پایین‌ترین میزان خود در تاریخ ۱۹۹۷/۳/۳ می‌رسد و پس از آن مرحله سکوت جای خود را به فعالیت لرزه‌ای می‌دهد و زلزله ماری زمانی روی می‌دهد که منحنی به سطح اولیه (صفر) باز می‌گردد.

همچنین روش *RTL* توسط دی‌ژیووامباتیستا و تیوپکین [۷] برای زلزله پالرمو ایتالیا تکرار شده و پیدایش آنومالی‌های لرزه‌ای قبل از این زلزله که با بزرگای ۵/۸ در ۶ سپتامبر ۲۰۰۲ در جزیره سیسیل رخ داده، بررسی شده است. در بررسی این زلزله نشان داده شد که آنومالی در دهه اول نوامبر ۲۰۰۱ شروع و به حداقل مقدار خود در اواخر مه ۲۰۰۲ می‌رسد. زلزله پالرمو بعد از بازگشت پارامتر *RTL* به سطح سابقه طولانی مدت خود (پس‌زمینه کاتالوگ) روی داده است.

الگوریتم *RTL* در منطقه با خطرپذیری بالای کامچاتکا روسیه نیز آزمایش شده است. در این منطقه سه زمین‌لرزه

در اینجا  $x_i$  و  $y_i$  مختصات منطبق بر کانون زلزله هستند و  $t_i$  زمان به وقوع پیوستن آن است. پارامتر  $RTL$  به شکل حاصل ضرب سه تابع تقسیم بر مقدار انحراف معیار آنها معرفی می‌شود. این سه تابع به ترتیب تابعی از مختصات رومرکز زلزله  $R$ ، تابعی از زمان  $T$  و تابعی از طول گسیختگی زلزله  $L$  است که در روابط (۳) تا (۵) شرح داده شده‌اند [۷].

$$R(x, y, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_s \quad (۳) \quad \text{تابع رومرکز}$$

$$T(x, y, t) = \left[ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_s \quad (۴) \quad \text{تابع زمان}$$

$$L(x, y, t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s & \text{if } r_i > e \\ \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{l_i}{e}\right)^p - L_s & \text{if } r_i \leq e \end{cases} \quad (۵) \quad \begin{array}{l} \text{تابع طول} \\ \text{گسیختگی} \end{array}$$

جمع‌بندی این روش بر کل  $n$  رویداد به وقوع پیوسته در ناحیه  $[r_{\max}, t_{\max}]$  انجام می‌شود. در این عبارات  $r_0$  معرف توان تضعیف اثر زلزله‌های رخ داده نسبت به فاصله‌شان  $r_i$  از نقطه  $(x, y)$  برای آنهاست که پارامتر  $RTL$  محاسبه شده می‌باشد. این محل را نقطه پیش‌بینی می‌نامند.

$r_i$  فاصله بین زلزله‌هایی را نشان داده که قبل از زمان  $t$  و نقطه آزمایشی روی داده،  $t_i$  زمان رویدادهای قبلی،  $l_i$  طول گسیختگی زلزله‌ها قبل از لحظه آزمایش می‌باشد. اغلب مقدار  $l_i$  مطابق با رابطه تجربی منطقه‌ای بین اندازه چشمه و بزرگای زلزله  $M_i$  محاسبه می‌شود. کمیت  $r_i$  و  $t_i$  بر زمان و مختصات کانون  $i$  امین زلزله منطبق است.  $r_0$  (که غالباً برابر ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود)، معرف تابع اصلاح‌کننده اثر فاصله کانون زلزله‌های گذشته نسبت به زلزله قوی (نقطه پیش‌بینی)،  $t_0$  (عموماً برابر مقدار ثابت یکسال فرض می‌شود)، معرف تابع اصلاح‌کننده زمان برای اصلاح اثر زمانی زلزله‌های قبلی نسبت به زمان زلزله قوی (نقطه پیش‌بینی) است.

توان  $p$  معرف سهم هر یک از زلزله‌هایی است که در آن ناحیه رخ داده‌اند؛ به طور مثال اگر  $p=1$  باشد، یعنی سهم متناسب است با نسبت طول چشمه گسیختگی نسبت به فاصله تا رومرکز  $i$  امین زلزله از نقطه پیش‌بینی و به هنگامی که  $p=2$  یا  $p=3$  مفروض است، یعنی سهم مذکور، متناسب شده با میدان گسیختگی (سطح یا حجم) و زمانی که  $p=0$

صوتی افزایش یابد. با این حال، تعداد این سیگنال‌های نسبتاً ضعیف پس از آن که بارگذاری به حداکثر برسد، کاهش می‌یابد. به این دلیل که شکافهای کوچک با توجه به کاهش نسبی تنش اضافی ایجاد نمی‌شود. در طول مرحله نهایی قبل از گسیختگی اصلی، فعالیت صوتی مجدداً افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، انتشار صوت در دو مرحله سکوت و فعالسازی قبل از گسیختگی اصلی انجام می‌شود [۴].

مشاهدات میدانی لرزه‌نگاری نیز وجود مراحل سکوت و فعالسازی لرزه‌ای در منطقه‌ای که رویدادهای قوی به وقوع می‌پیوندد را نشان می‌دهد. در بین تمام تغییرات لرزه‌خیزی، سکوت لرزه‌ای، که با عنوان "کاهش لرزه‌خیزی متوسط در مقایسه با میزان پیش‌زمینه قبلی داخل و اطراف مناطق کانونی" تعریف شده، ممکن است یکی از نویدبخش‌ترین نشانگرهای میان‌مدت باشد.

در سالهای دهه ۹۰ میلادی یک روش آماری به منظور بررسی ویژگیهای تغییرات لرزه‌خیزی از جمله الگوهای سکوت و فعالسازی توسعه یافته است. این روش الگوریتم  $RTL$  نامیده شده که نام  $RTL$  برگرفته شده از  $R$ : ناحیه (فاصله کانونی)،  $T$ : فاصله زمانی و  $L$ : طول (اندازه گسیختگی) است. الگوریتم  $RTL$  بر اساس قواعد مربوط به مدل‌سازی فیزیکی است و  $RTL$  پارامتری برای بازتاب ترکیب سه تابع به ترتیب: فاصله، زمان و طول گسیختگی می‌باشد. هر سه پارامتر (زمان، مکان و بزرگا) زلزله با یک ضریب وزنی در این الگوریتم در نظر گرفته می‌شوند. اساس این تئوری بر تأثیرات متقابل زلزله‌ها بر یکدیگر بنا شده است. در این روش از مفهوم پیشنهادی زسوا [۸] به نام  $(SEISMOLAP)$  به عنوان اساس فیزیکی تعیین‌کننده استفاده شده است.

مفهوم پارامتر  $RTL$  بر پایه انتخاب نقطه‌ای به مختصات  $(x, y)$  در زمان  $t$  است که بر اساس اطلاعات زمین‌لرزه‌ها (کاتالوگ) محاسبه می‌شود. زلزله‌هایی در محاسبه وارد می‌شود که در محدوده مکان و زمان  $[r_{\max}, t_{\max}]$ ، با شرایطی مطابق روابط (۱) و (۲) رخ داده‌اند [۹]:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \leq r_{ma} \quad (۱)$$

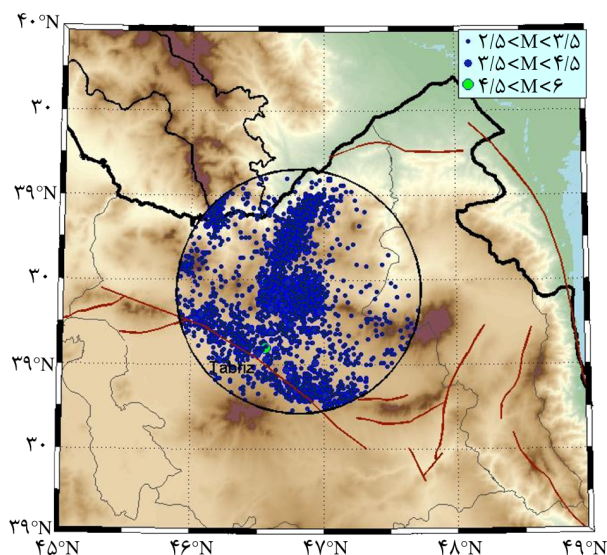
$$0 \leq t - t_i \leq t_{\max} \quad (۲)$$

معمولاً چند ماه تا چند سال قبل از زلزله اصلی رخ می‌دهد؛ لذا باید  $RTL$  را به عنوان یک پیش‌نشانگر میان‌مدت (در حد چند سال) در نظر گرفت و این روش برای پیش‌نشانگر کوتاه‌مدت (چند هفته تا چند ماه) کارایی ندارد [۲]. برای مثال جنтели [۱۰] در مطالعه روندهای مشاهده‌شده قبل از زلزله سالهای اخیر ایتالیا، بازه شروع سکوت لرزه‌ای تا وقوع زلزله را بین ۰/۶ تا ۴ سال به دست آورده که زمان این سکوت نیز بین ۰/۶ تا ۳ سال متغیر بوده است.

### ۳- به کارگیری روش $RTL$ در پیش‌بینی زلزله اهر-ورزقان

#### ۳-۱- استخراج داده‌ها

داده‌های بعد از سال ۲۰۰۶ مربوط به زلزله اهر-ورزقان از کاتالوگ زلزله مرکز لرزه‌نگاری کشوری در فاصله ۸۰ کیلومتری از رومرکز این زلزله استخراج می‌گردد. علت استخراج زلزله‌های بعد از سال ۲۰۰۶، یکنواختی بزرگای گزارش شده و دقت ثبت یکسان در شبکه تبریز مرکز لرزه‌نگاری کشوری است. این داده‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱): زمین‌لرزه‌های منتخب رخ داده بعد از سال ۲۰۰۶ و در فاصله ۸۰ کیلومتری از رومرکز آنها.

### ۳-۲- آماده‌سازی داده‌ها (همکن‌سازی کاتالوگ و حذف حوادث وابسته)

با انتخاب محدوده‌ای حدود یک درجه در یک درجه در

است یعنی سهم هر زلزله که در گذشته واقع شده مستقل از طول چشمه گسیختگی آن، در نظر گرفته شده است. سه تابع  $L_s$ ،  $T_s$  و  $R_s$  تابع‌های اصلاح‌کننده زمان، مکان و طول گسیختگی رومرکز هستند که از طریق میانگین‌گیری کل مقادیر  $RTL$  محاسبه شده برای کاتالوگ به دست می‌آیند. وجود این توابع در واقع برای حذف/اصلاح روندهای افزایش یا کاهش<sup>\*</sup> تجمعی مقدار  $RTL$  لازم است.

مقدار  $e$  اغلب معادل ۱۰ کیلومتر است. مجموع فرمولهای بالا بر گرفته از زلزله‌هایی با بزرگی  $M_{min} < M < M_{max}$  است که به فاصله زمانی  $(t-2t_0, t)$  در دایره  $\Omega_c$  با شعاع  $2t_0$  واقع شده که به مرکز نقطه آزمایشی  $x$  رسم شده است. در حقیقت گام نخست محاسبه، ترسیم دایره‌ای به شعاع  $2t_0$  به مرکز نقطه مورد نظر است [۳].

پارامتر  $RTL$  در نقطه نمونه فضا-زمان  $(x, t)$  محاسبه شده که از ضرب سه تابع  $R(x, y, t)$ ،  $T(x, y, t)$  و  $L(x, y, t)$  مانند رابطه (۶) نتیجه می‌شود.

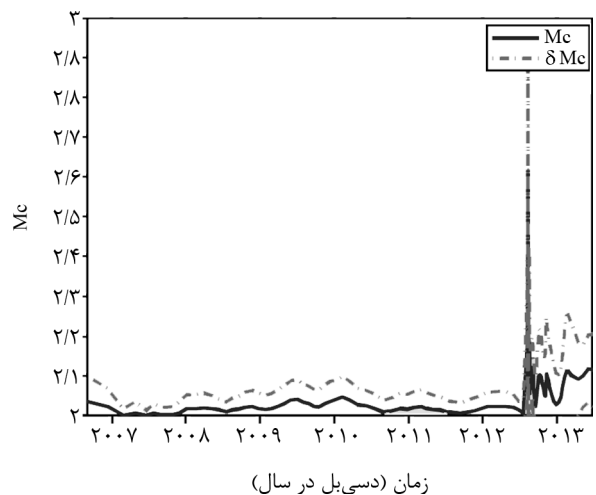
$$RTL(x, y, t) = \frac{R(x, y, t)}{\sigma_R} \cdot \frac{T(x, y, t)}{\sigma_T} \cdot \frac{L(x, y, t)}{\sigma_L} \quad (6)$$

به منظور دقت در کار کمیت‌های  $R, T, L$  هر یک به وسیله انحراف معیار خود،  $\sigma$  نرمال می‌شوند.  $T(x, y, t)$ ،  $R(x, y, t)$  و  $L(x, y, t)$  سه تابع بدون بعد بوده و بیشتر با انحراف استاندارد به ترتیب برابر  $\sigma_R$ ،  $\sigma_T$  و  $\sigma_L$  مشخص می‌شوند. در واقع، محصول سه عملگر بالا با عنوان پارامتر  $RTL$  محاسبه شده که انحراف از سطح زمینه لرزه‌خیزی را بیان کرده و در واحد انحراف استاندارد  $\sigma = \sigma_R \sigma_T \sigma_L$  بیان شده است.

در حقیقت همان‌طور که اشاره شد، تعبیر تغییرات این انحراف معیار به صورت  $RTL$  منفی به معنی لرزه‌خیزی پایین در مقایسه با میزان زمینه در اطراف محل بررسی است و  $RTL$  مثبت لرزه‌خیزی بالا را در مقایسه با این زمینه نشان می‌دهد [۳]. مقدار  $M_{min}$  در محاسبات همان سطح کامل کاتالوگ است. پارامترهای  $M_{max}$ ،  $t_0$  و  $t_0$  به طور تجربی انتخاب می‌شوند. معمولاً  $M_{max} = M_{seq} - 2$  و در آن  $M_{seq}$  شدت زلزله بزرگ مورد بررسی (زلزله‌ای که قرار است پیش‌بینی شود) است. همچنین به این نکته اشاره می‌شود طبق مطالعات صورت گرفته، تغییر در مقدار  $RTL$

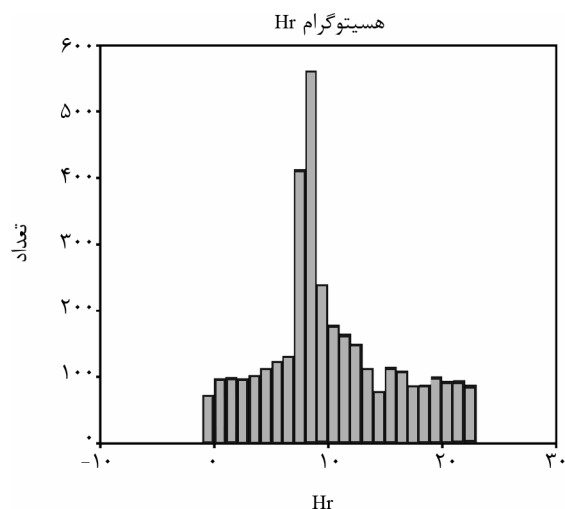
نشده است. روابط تجربی به دست آمده برای تبدیل بزرگای ناتلی و محلی [۱۱] نشان می‌دهد که این دو بزرگا در محدوده زیر  $M < 4/5$  اختلاف بسیار کمی (در حد دهم واحد) با هم دارد. در مقادیر بیشتر بزرگا، واحد ناتلی مقدار بزرگتری برای بزرگای زلزله می‌دهد که هنگام حذف پس‌لرزه‌ها در جهت اطمینان خواهد بود؛ زیرا جداول پنجره زمانی-مکانی گاردنر و نوپوف [۱۲] در اصل بر مبنای  $M_L$  یا  $M_S$  قرار دارد. زلزله‌های قبل از سال ۲۰۰۶ به دلیل مشکلاتی نظیر بالابودن حد کامل بودن، یکنواخت نبودن توزیع زمانی و ... مورد استفاده قرار نگرفته است. تأکید می‌شود که در این مقاله جهت رعایت حداکثر دقت از تلفیق کاتالوگهای مختلف اجتناب شده و همه داده‌ها به صورت یکسان از کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری استخراج شده است. پس از تعیین بزرگای حد کامل بودن فیلتری در روی حد بزرگا اعمال شده و تنها بزرگای بیش از  $M_c$  در تحلیل‌های نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. در گام بعدی، پس‌لرزه‌های موجود به کمک الگوریتم پنجره‌های زمانی-مکانی گاردنر و نوپوف [۱۲] با استفاده از نرم‌افزار *zmap* حذف شده است. در این منطقه تعداد ۳ هزار و ۵۱۷ زلزله از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۱۳ گزارش شده که از این تعداد تنها ۳۰۶ خوشه باقی مانده و ۴۸ درصد گشتاور پس‌لرزه‌ها آزاد شده‌اند. این مقدار بزرگ برای درصد گشتاور حاصل از پس‌لرزه‌ها به دلیل وجود زلزله‌ای با بزرگای نزدیک به زلزله اصلی یازده دقیقه بعد از وقوع زلزله اولیه است. روشهای دیگری نیز برای حذف پس‌لرزه‌ها وجود دارد که معروفترین آن روش ریزنبرگ [۱۳] است. در مطالعه جامع جنتلی [۱۰] بر روی کاتالوگ ایتالیا، عملکرد این دو الگوریتم مقایسه شده است. در مقایسه اول از لحاظ کارایی در حذف حوادث وابسته، الگوریتم گاردنر-نوپوف [۱۲] بهتر از الگوریتم ریزنبرگ عمل کرده است و در مقایسه بعدی از لحاظ نتیجه استفاده از کاتالوگهای دیکلاستر شده با این دو الگوریتم روی *RTL*، هر دو الگوریتم عملکرد تقریباً یکسانی داشته و در مورد دو زلزله نیز حتی الگوریتم گاردنر-نوپوف بهتر عمل کرده که با توجه به این مطالعه نیازی به در نظر گرفتن الگوریتم ریزنبرگ احساس نشد. پس از حذف پس‌لرزه از کاتالوگ زلزله تعداد ۸۸۸ حادثه مستقل باقیمانده است.

اطراف هر یک از زلزله‌ها، بزرگای کامل بودن آنها به کمک روش حداکثر انحنای\* موجود در نرم‌افزار (*zmap*) تعیین شده است. اندازه نمونه\* برابر با ۸۰ زلزله\* حداقل تعداد داده در نمونه ۵۰ و همپوشانی\* نمونه‌ها چهار عدد و تعداد برابر ۲۰۰ و دسته‌های بزرگا ۰/۱ واحد انتخاب شده است. به دلیل اجتناب از خطای اضافه تبدیل بزرگا از بزرگای گزارش شده مرکز لرزه‌نگاری کشوری (*Mn*) استفاده شده است. جنتلی [۱۰] در بررسی تغییرات زمانی دقت ثبت در کاتالوگ ایتالیا جهت اعمال *RTL* و برای محاسبه بزرگای کامل بودن، ابتدا کاتالوگ زلزله‌ها را دیکلاستر کرده است. وی دلیل این کار را اعمال سیاستهای متفاوت (مثلاً اضافه شدن ایستگاههای محلی نصب شده موقت) در ثبت پس‌لرزه‌های بعد از زلزله‌های اصلی یا خوشه‌های لرزه‌ای می‌داند. با توجه به اینکه کاتالوگ استفاده شده در این تحقیق (کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری)، فاقد رویدادهای ثبت شده توسط شبکه‌های موقت است، لزومی برای این کار احساس نشد. بعد از انجام آنالیز تعیین حد کامل بودن با زمان، بزرگای کامل بودن برای منطقه اهر-ورزقان با کمی تسامح انتخاب شده است، شکل (۲).



شکل (۲): آنالیز کامل بودن داده‌ها در محدوده زلزله اهر-ورزقان ( $M_c = 2/1$ ).

همان‌گونه که بیان شد بزرگای استفاده شده در کاتالوگها که جهت حفظ اصل یکنواختی و همگن بودن؛ همه از شروع سال ۲۰۰۶ و از وبسایت مرکز لرزه‌نگاری کشوری استخراج شده؛ جهت به حداقل رساندن عدم قطعیت تبدیل



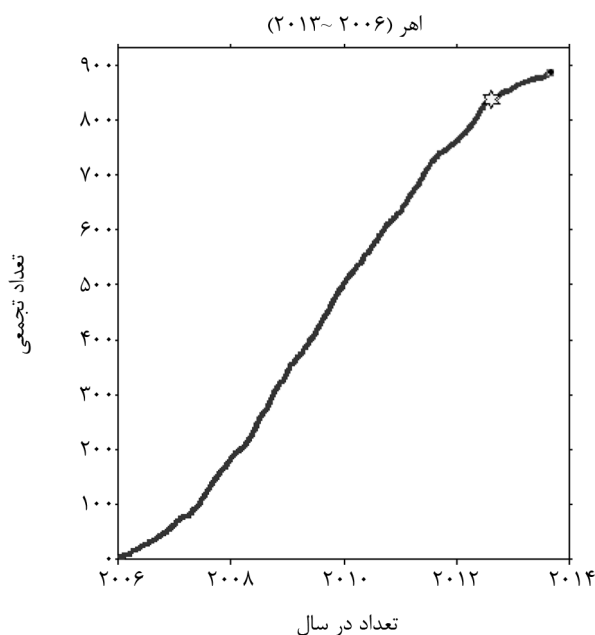
شکل (۴): هیستوگرام توزیع تعداد زلزله در ناحیه اهر- ورزقان در ساعات مختلف شبانه روز.

در معادن) است؛ از کاتالوگ این منطقه حذف شده که در این ناحیه از بزرگای حد کامل بودن  $M_c = 2$  استفاده شده است.

#### ۴- نتایج آزمون روش RTL بر کاتالوگ زلزله‌های منتخب و بحث در خصوص آن

بعد از تهیه کاتالوگ داده‌های لازم، الگوریتم نوشته شده روش RTL در محیط نرم‌افزار Matlab به این داده‌ها اعمال شد. نتایج به دست آمده برای مقادیر پارامترهایی که در جدول (۱) ارائه شده، به دست آمده است. پارامتر  $e$  که بیانگر دقت در تعیین محل رومرکز در کاتالوگ مورد استفاده است، در مطالعه جنتلی [۱۰] برای ایتالیا ۷/۵ کیلومتر لحاظ شده است. در اینجا با فرض دقت کمتر شبکه مرکز لرزه‌نگاری کشوری، مقدار پارامتر  $e$  در محاسبه همانند برخی از مطالعات قبلی برابر ۱۰ کیلومتر فرض شده است. مقدار بزرگای حداکثر در محاسبات معمولاً دو واحد کمتر از بزرگای رویداد اصلی منظور می‌شود [۱۴]. ولی در این مطالعه با توجه به تعداد

بعد از حذف حوادث وابسته، بررسی روند تجمعی زلزله‌ها با زمان نشان می‌دهد که در این سالها (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۳) روند ثبت حوادث در منطقه تغییر محسوس نکرده است، شکل (۳). به بیان دیگر اطلاعات ثبت شده ناشی از مشکلات موجود در شبکه یا کم شدن یا زیاد شدن پوشش آن نیست. در خصوص زلزله اهر- ورزقان آنالیز توزیع تعداد زلزله در زمان نشان‌دهنده وجود دو ساعت اوج\* در هیستوگرام تعداد- زمان زلزله است، شکل (۴). با توجه به اطلاعات در خصوص وجود معادن در نزدیک تبریز و ارمنستان بازه زمانی هشت تا ده صبح (به وقت گرینویچ) که تقریباً معادل ساعت ۱۲ تا ۲ بعد از ظهر به وقت محلی (زمان انجام آتشفباری

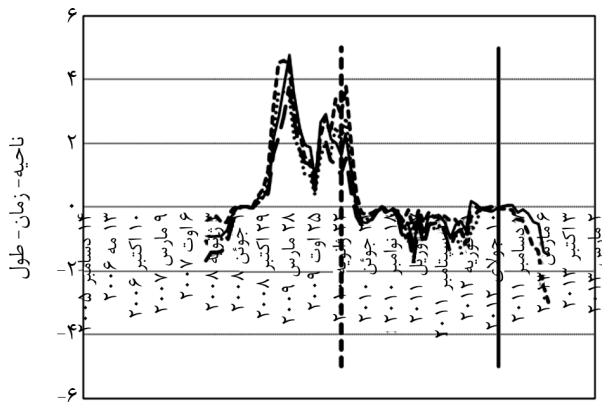


شکل (۳): تعداد تجمعی رویدادهای اصلی (بعد از حذف حوادث وابسته) با بزرگای بیش از  $M > 2$ ، ثبت شده در محدوده ۸۰ کیلومتری اهر- ورزقان. محل زلزله مورد مطالعه با ستاره مشخص شده است. کاهش شیب تعداد داده ثبت شده بعد از رخداد اصلی ناشی از حذف پس‌لرزه‌های آن است و به تغییرات شبکه مربوط نیست.

جدول (۱): مشخصات زلزله اهر ورزقان و پارامترهای انتخابی برای بررسی تغییرات RTL در رومرکز زلزله.

$r_0$ (کیلومتر)	$t_0$ (سال)	مختصات رومرکز		$M_{max}$	$M_c$	$M_n$	$N_e$ $r < 60$ (کیلومتر)	تاریخ	نام زلزله
		Lon.	Lat.						
۴۰، ۳۰	۱۰، ۰/۷۵، ۰، ۰/۵	۴۶/۸۱۲	۳۸/۴۳۳	۴/۴	۲	۶/۱	۱۴۴ (۲۵۰)*	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	اهر- ورزقان

\* تعداد زلزله در شعاع هشاد کیلومتری در داخل پراکنش نوشته شده است.



شکل (۵): تغییرات پارامتر RTL (در واحد انحراف معیار) محاسبه شده تا زمان وقوع، برای زلزله اهر- ورزقان، بازه محاسبه سی روز،  $T_0 = 30$  کیلومتر و  $t_0 = 1$  (خط چین طویل) و بار دیگر  $T_0 = 40$  کیلومتر (خط نقطه) انتخاب شده است. زمان زلزله با خط قائم سمت راست مشخص شده است. زلزله با بزرگای  $4/8$  در تاریخ دوم ژانویه ۲۰۱۰ در سمت چپ مشخص شده است. بار دیگر نتایج تا سال ۲۰۱۳ ترسیم شده است.

زلزله‌ای که با بزرگای  $4/8$  در تاریخ دوم ژانویه ۲۰۱۰ در فاصله شصت تا هشتاد کیلومتری از زلزله اهر- ورزقان رخ داده نیز روی شکل مشخص شده است. برای نشان دادن تأثیر زمان قطع محاسبه RTL بر روی نتایج بار دیگر آنالیز تا سال ۲۰۱۳ تکرار شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است کاهش میزان RTL در قبل از زلزله اهر- ورزقان به خوبی آشکار است.

اهمیت نتیجه‌گیری فوق بر این استوار است که تعداد زلزله موجود در شعاع هشتاد کیلومتری رومرکز برای زلزله اهر- ورزقان حدود ۷۳ درصد بیش از تعداد زلزله در شعاع شصت کیلومتری است. با توجه به تعداد کم زلزله‌ها در شعاع شصت کیلومتری، این مقایسه پایداری جوابها\* را نشان می‌دهد. زیرا محاسبه صورت گرفته برای شعاع بیشتر که به دلیل تعداد زلزله بیشتر از سطح اطمینان بالاتری (از لحاظ آماری) برخوردار است، به نوعی تأییدکننده محاسبه انجام شده با داده کمتر در شعاع شصت کیلومتر می‌باشد. به هر روی انتخاب پنجره زمانی و مکانی در روش RTL مهمترین بخش و حساسترین قسمت کاربرد این روش است [۱۰]. بررسیهای جنتلی نشان داده است که نتایج به تغییرات  $t_0$  بیش از تغییرات  $T_0$  حساس است. جنتلی با بررسی روی

کمتر داده‌ها، از مقادیر به نسبت بالاتری برای  $M_{max}$  استفاده شده است. علاوه بر این، RTLها در گامهای زمانی یک ماه محاسبه شده است. از آنجا که مقادیر RTL با استفاده از زلزله‌های واقع در پنجره یا بازه زمانی  $(t - T_{max}, t)$  محاسبه می‌شود، امکان محاسبه آن در زمانهای کمتر از  $t_{cs} + T_{max}$  وجود ندارد؛ که در اینجا  $t_{cs}$  زمان شروع و آغاز کاتالوگ (اول سال ۲۰۰۶ میلادی) و  $T_{max} = 2t_0$  است. بنابراین با توجه به این نکته، زمان نقطه آغاز محاسبات ابتدای سال ۲۰۰۸ میلادی بوده است. یکی از چالشهای کاربرد روش RTL در ایران، نیاز الگوریتم به داشتن یک پیشینه مناسب از لرزه‌خیزی محل مورد بررسی است. این داده‌ها برای پایدار شدن الگوریتم نیاز است. برای مثال در ایتالیا حداقل هفت سال ثبت داده پیش از رویداد اصلی به عنوان پیش شرط کاربرد منظور شده است [۱۰]. اما با توجه به کوتاه بودن عمر شبکه در ایران و اصرار بر انتخاب قسمت همگن کاتالوگ (از سال ۲۰۰۶) این زمان برای زلزله اهر- ورزقان حدود هفت سال است.

برای محاسبه بعد گسیختگی\* از رابطه تجربی زیر استفاده شده است [۶].

$$\text{Log}(km) = 0.44M - 1.289 \quad (7)$$

شکل (۵)، روند تغییرات مقدار RTL محاسبه شده در این منطقه را از ابتدای سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. روشن است که پارامتر RTL در بازه دو سال قبل از زلزله اهر- ورزقان نسبت به سطح زمینه کاهش را تجربه کرده که بیانگر وجود سکوت لرزه‌ای\* واضحی در این ناحیه بوده که می‌تواند بیانگر مرحله آماده‌شدن\* منطقه برای زلزله باشد.

با توجه به شعاع تأثیر بیشتر، نتایج آنالیز در شعاع بزرگتر هشتاد کیلومتر برای این زلزله، تفاوت محسوسی با شعاع شصت کیلومتر نداشت. همان‌گونه که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود روندهای تغییرات RTL با زمان در این منطقه (در شعاع ۸۰ و ۶۰ کیلومتری) یکسان و تفاوتها تنها در مقدار مطلق این پارامتر است که اهمیت زیادی ندارد. این موضوع در ادامه به کمک آنالیز مقدار همبستگی روشنتر خواهد شد.

اثبات می‌رسد. در واقع با تغییر  $T_0$  تغییر خاصی در نتایج مشاهده نشده است.

البته در تحلیل نتایج به دست آمده باید به تعداد نسبتاً کم زلزله‌های موجود در هر منطقه، توجه داشت. مطالعات قبلی نشان داده که نتایج با زیاد شدن مقدار حد کامل بودن تفاوت چندانی نمی‌کند [۵]. با توجه به این که در اینجا فقط یک زلزله مورد بررسی قرار گرفته می‌بایست عملکرد الگوریتم در سایر زلزله‌های بزرگ و متوسط فلات ایران که در نواحی با پوشش مناسب شبکه‌های لرزه‌نگاری رخ خواهند داد، سنجیده شود.

**جدول (۲):** مقادیر ضریب همبستگی بین پارامترهای  $RTL$  محاسبه شده با فرضیات مختلف، برای زلزله اهر-ورزقان. در این محاسبات، مقادیر  $RTL$  تا سال ۲۰۱۳ مبنای بوده است.

$T_0$ (کیلومتر)	$t_0$ (سال)	ضریب همبستگی
۳۰/۴۰	۰/۱۵ / ۰/۱۵	۰/۹۹
۳۰/۳۰	۰/۱۵ / ۰/۱۷۵	۰/۸۱
۳۰/۴۰	۰/۱۵ / ۰/۱۷۵	۰/۷۹
۳۰/۳۰	۰/۱۵ / ۱/۱۰	۰/۷۶
۳۰/۴۰	۰/۱۵ / ۱/۱۰	۰/۷۹
۴۰/۳۰	۰/۱۵ / ۰/۱۷۵	۰/۸۱
۴۰/۴۰	۰/۱۵ / ۰/۱۷۵	۰/۱۸
۴۰/۳۰	۰/۱۵ / ۱/۱۰	۰/۷۴
۴۰/۴۰	۰/۱۵ / ۱/۱۰	۰/۱۸
۳۰/۴۰	۰/۱۷۵ / ۰/۱۷۵	۰/۹۵
۳۰/۳۰	۰/۱۷۵ / ۱/۱۰	۰/۹
۳۰/۴۰	۰/۱۷۵ / ۱/۱۰	۰/۸۶
۴۰/۳۰	۰/۱۷۵ / ۱/۱۰	۰/۸۵
۴۰/۴۰	۰/۱۷۵ / ۱/۱۰	۰/۹
۳۰/۴۰	۱/۱۰ / ۱/۱۰	۰/۹۴

## ۵- مراجع

- Chen, C.C. and Wu, Y.X. (2006). An improved region-time-length algorithm applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, *Geophysical Journal International*, **166**, 1144-1147.
- Huang, Q. and Nagao, T. (2002). Seismic quiescence before the 2000 M=7.3 Tottori earthquake, *Geophysical Research Letters*, **29**, 1578.

دوازده زلزله ایتالیا که مقدار  $t_0 = 2-0.2$  سال با بازه  $0.1$  و مقدار  $T_0 = 80-15$  کیلومتر با بازه  $5$  کیلومتر انتخاب شده است، نهایتاً با به کارگیری روش چن و وو [۱] به این نتیجه رسیده که مقدار  $T_0$  بین  $15$  تا  $65$  کیلومتر و با میانگین مقادیر  $40 \sim T_0$  کیلومتر و مقدار  $t_0$  بین  $0.4$  تا  $1.7$  سال با میانگین  $1 \sim t_0$  سال است. برای زلزله‌های بزرگتر نظیر چی‌چی تایوان یا از میت ترکیه ابعاد بزرگتری نظیر  $T_0 = 100$  کیلومتر نیز انتخاب شده است [۲].

همچنین جنتلی [۱۰] در بررسی خود از مقدار  $T_0 = 30$  کیلومتر و  $t_0 = 1$  سال به عنوان مقادیر استاندارد روش استفاده کرده است. با توجه به این موارد، در نظر گرفتن اندازه بزرگ و بعد زلزله مورد بررسی که از دسته متوسط است، در این مطالعه مقادیری در محدوده مقدار استاندارد انتخاب و سعی شده که بهترین مقدار با آنالیز همبستگی پیشنهادی هوانگ [۳] روی این مجموعه محدود از جوابها، به دست آید.

همان‌گونه که ذکر شد، در این جا همانند روش به کار رفته در هوانگ، دو پارامتر اصلی محاسبه یعنی شعاع  $T_0$  و زمان  $t_0$  برابر مقادیر متفاوت بیست، سی و چهل کیلومتر و یک، نیم و سه چهارم سال فرض شده و محاسبه متغیر  $RTL$  صورت گرفته است. برای بررسی این که پارامتر پاسخ تا چه حد به تغییرات ورودی (فرضیات به کار رفته در خصوص شعاع و زمان محاسبه) حساس است؛ تابع همبستگی\* بین نتایج با حالت‌های مختلف محاسبه شده است، جدول (۲). مقادیر بالای ضریب همبستگی نشان‌دهنده این نکته است، تغییرات رفتار  $RTL$  به فرضیات محاسبه حساس نیست. به بیان دیگر، نتایج تحلیل ضریب همبستگی نشان می‌دهد که آنومالی‌های مشاهده شده در پارامتر  $RTL$  نه یک نتیجه مصنوعی (ناشی از شانس) بلکه یک واقعیت فیزیکی را بیان می‌کند. چنین نتایجی پیش از این برای زلزله‌های دیگر نظیر کوبه و توتوری ژاپن، چی‌چی تایوان و از میت ترکیه به دست آمده است. همانند محاسبات پیشین (جنتلی)، در اینجا نیز حساسیت پارامتر  $t_0$  بیش از پارامتر  $T_0$  است و این نکته با توجه به مقدار کمتر ضریب همبستگی بین حالت‌هایی که  $t_0$  به ازای شعاع ثابت، تغییر می‌کند؛ به



- (2012). A Unified seismic catalog for the Iranian plateau (1900-2011), *Seismological Research Letters*, **2**, 233-249.
12. Gardner, J.K. and Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, poissonian?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **64**(5), 1363-1367.
13. Reasenber, P. (1985). Second-order moment of central California seismicity, 1969-82, *Journal of Geophysical Research*, **90**, 5479-5495.
14. Gentili, S. and Bressan, G. (2008). The partitioning of radiated energy and the largest aftershock of seismic sequences occurred in the northeastern Italy and western Slovenia, *Journal of Seismology*, **12**, 343-354.
3. Huang, Q. (2004). Seismicity pattern changes prior to large earthquakes-an approach of the RTL algorithm, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15**, 469-491.
4. Sobolev, G.A., Huang, Q., and Nagao, T. (2002). Phases of earthquake's preparation and by chance test of seismic quiescence anomaly, *Journal of Geodynamics*, **33**, 401-412.
5. Di Giovambattista, R. and Tyupkin, Y.S. (1999). The fine structure of the dynamics of seismicity before M C 4.5 earthquakes in the area of Reggio Emilia (Northern Italy), *Annali di Geofisica*, **42**, 897-909.
6. Di Giovambattista, R. and Tyupkin, Y.S. (2000). Spatial and temporal distribution of the seismicity before the Umbria-Marche September 26, 1997 earthquakes, *Journal of Seismology*, **4**, 589-598.
7. Di Giovambattista, R. and Tyupkin, Y.S. (2004). Seismicity patterns before the M = 5.8 2002, Palermo (Italy) earthquake: seismic quiescence and accelerating seismicity, *Tectonophysics*, **384**, 243-255.
8. Zschau, J. (1995). SEISMOLAP: A quantification of seismic quiescence and clustering, IUGG, XXI General Assembly, Abstracts, A, A 389.
9. Завьялов А.Д. (2008). Среднесрочный Прогноз Землетрясений-Основы Методика Реализация.
10. Gentili, S. (2010). Distribution of seismicity before the larger earthquakes in Italy in the time interval 1994-2004, *Pure and Applied Geophysics*, **167**, 933-958.
11. Shahvar, M.P., Zare, M., and Castellaro, S.

## ۶- واژگان تخصصی

Region-Time-Length (RTL)	ناحیه- زمان- طول:
Linear trend corrections	تصحیح روندهای افزایشی یا کاهششی:
Maximum curvature	حداکثر انحنا:
Sample window size	اندازه نمونه:
Overlap	همپوشانی:
Peak	اوج:
Rupture dimension	بعد گسیختگی:
Seismic quiescence	سکوت لرزه‌ای:
Preparation	مرحله آماده شدن:
Robustness	پایداری جوابها:
Correlation function	تابع همبستگی: