

## پیش‌بینی‌های میان‌مدت زمین‌لرزه در ایران براساس الگوریتم M8

نوید شادمنان<sup>\*</sup>، نوربخش میرزائی<sup>\*</sup>، عبدالرضا قدس<sup>\*\*</sup> و فروغ کشوری<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

<sup>\*\*</sup>مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان صندوق پستی ۱۱۵۹-۴۵۱۱۹۵

(دریافت مقاله: ۸۳/۷/۲۸، پذیرش مقاله: ۸۴/۱۲/۹)

### چکیده

الگوریتم M8 روشی برای پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه‌های بزرگ (بزرگی ۶/۵ ریشتر یا بیشتر) است. این الگوریتم فعالیت‌های لرزه‌ای پیش‌آگاهی دهنده قبل از زمین‌لرزه‌های بزرگ را مورد بررسی قرار می‌دهد. از این فعالیت‌ها برای شناسایی هنگام اعلام خطر یا زمان بیشترین احتمال وقوع (TIP، times of increased probability) زمین‌لرزه‌های بزرگ استفاده می‌شود. هر TIP به مدت ۵ سال به ناحیه‌ای که وسعت آن چندین برابر اندازه چشمه زمین‌لرزه در حال وقوع است، اشاره می‌کند. تاکنون چندین زمین‌لرزه بزرگ براساس الگوریتم M8، به‌طور موفقیت‌آمیز پیش‌بینی شده است. در این تحقیق، با استفاده از این الگوریتم پهنه ایران برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آتی (پیش‌بینی پیشرو) مورد آزمایش قرار گرفته است. کاربرد الگوریتم M8 وجود چند منطقه خطر برای وقوع زمین‌لرزه‌های آتی را در نقاط مختلف ایران نشان می‌دهد. این مناطق اعلام خطر در غرب و جنوب‌غرب ایران قرار دارند.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی میان‌مدت، الگوریتم M8، زمان بیشترین احتمال وقوع، پیش‌بینی بازنگرانه، پیش‌بینی پیشرو، پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای، الگوی لرزه‌خیزی

### ۱ مقدمه

سایر داده‌های پیش‌نشانگری است. به همین دلیل، زلزله‌شناسان، الگوریتم‌های متفاوتی را براساس پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای طراحی و ابداع کرده‌اند که کارآیی خوبی را نیز از خود نشان داده‌اند. الگوریتم M8 یکی از معتبرترین این الگوریتم‌ها است که تاکنون توانسته است چندین زمین‌لرزه بزرگ را به‌طور موفقیت‌آمیز پیش‌بینی کند (کیلیس-بوروک و کوسوبوکف، ۱۹۹۰).

الگوریتم M8 در ایران برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۶/۵ ریشتر و بیشتر، از سال ۱۹۹۰ مورد آزمایش قرار گرفته است. کاربرد بازنگرانه الگوریتم M8 در زمین‌لرزه رودبار ( $M_s = 7/7$ ، ۱۹۹۰) نشان‌دهنده پیش‌بینی موفقیت‌آمیز این زمین‌لرزه بود (قدس، ۱۳۸۱). آزمایش مجدد الگوریتم M8 برای پیش‌بینی بازنگرانه زمین‌لرزه‌های رودبار، کرمان، قائن، بم و بلده نتایج قابل قبولی را به‌دست می‌دهد (قدس، ۱۳۸۱ و شادمنان،

بررسی روند وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ نشان می‌دهد که در اکثر موارد، فعالیت‌های پیش‌آگاهی‌دهنده، قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ مشاهده می‌شود. پیش‌آگاهی دهنده‌ها یا در واقع پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه‌ها انواع مختلفی دارند و در بازه‌های زمانی و مکانی متفاوتی قبل از وقوع زمین‌لرزه‌ها ظاهر می‌شوند. از مهم‌ترین این پیش‌نشانگرها که ارتباط مستقیمی با زمین‌لرزه‌ها دارند، می‌توان به پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای اشاره کرد. پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای مزیت‌های فراوانی نسبت به سایر پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه‌ها دارند، از جمله اینکه، این پیش‌نشانگرها گسترش مکانی و زمانی وسیعی دارند و در فواصل دورتر از رومرکز زمین‌لرزه اصلی نیز قابل ثبت‌اند. از سوی دیگر، دستگاه‌ها و مراکز ثبت پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای در سطح دنیا فراوانی بیشتری دارند، از این‌رو، حجم داده‌های پیش‌نشانگری از این نوع به مراتب بیشتر از

لرزه‌ای غالباً به دلایل زیر است: از یک سو، تقسیم‌بندی‌های لرزه‌زمین‌ساختی یک منطقه که پژوهشگران متفاوت آنها را عملی ساخته‌اند، متنوع‌اند، به نحوی که در بعضی موارد این تقسیم‌بندی‌ها هیچ وجه تشابهی با یکدیگر ندارند، و از سوی دیگر، در طی وقوع زمین‌لرزه خیلی بزرگ، منطقه تحت تأثیر این زمین‌لرزه منحصر به مرز ایالت لرزه‌زمین‌ساختی خاصی نیست، بلکه محدوده خیلی وسیعی، از جمله ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی مجاور نیز تحت تأثیر فعالیت‌های لرزه‌ای قرار می‌گیرند. در نهایت، برای نمونه‌برداری منظم از کل منطقه مورد بررسی از اشکال هندسی استفاده می‌شود. در داخل هر دایره، توالی زمین‌لرزه‌ها که در آن پس‌لرزه‌ها از زمین‌لرزه‌های اصلی زدوده شده‌اند، مورد توجه قرار می‌گیرد. پس‌لرزه‌ها باعث تضعیف اثر زمین‌لرزه‌های اصلی با بزرگی‌های کوچک می‌شوند، به همین دلیل، بایستی از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها حذف شوند (کوسوبوکف، ۱۹۹۷). این توالی با  $\{e\} = \{t_i, m_i, h_i, b_i\}$ ،  $i = 1, 2, \dots$ ، نشان داده می‌شود که در آن  $t_i$  زمان وقوع با  $t_{i+1} \leq t_i$ ،  $m_i$  بزرگی،  $h_i$  عمق کانونی و  $b_i(e)$  تعداد پس‌لرزه‌ها با بزرگی  $M_{aft}$  یا بیشتر در  $e$  روز پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی‌اند. مقادیر  $M_{aft}$  و  $e$  به بزرگی زمین‌لرزه اصلی بستگی دارند. توالی زمین‌لرزه‌ها با حد پایین بزرگی  $M = M_{\min}(\tilde{N})$  نرمالیزه می‌شود که در آن  $\tilde{N}$  مقدار استاندارد فراوانی سالیانه زمین‌لرزه‌ها (به‌طور پیش‌فرض برابر ۱۰ و ۲۰) در توالی است.

الگوریتم M8 میانگین‌هایی را بر اساس دنباله پنجره زمانی  $(t-s, t)$  و بازه بزرگی  $M_{\min}(\tilde{N}) \leq m_i < M_0$  محاسبه می‌کند. مقدار  $s$  معمولاً ۶ سال انتخاب می‌شود. نمودار زمانی فعالیت‌های پیش‌آگاهی‌دهنده در یک منطقه، به دلیل تحولات لرزه‌زمین‌ساختی و وقوع زمین‌لرزه‌هایی با تعداد و بزرگی‌های متفاوت، ممکن است معمولاً در بازه‌های زمانی کوچک دارای تغییرات شدید و

۱۳۸۳). بر همین اساس، الگوریتم M8 برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آتی (پیش‌بینی پیشرو) در کل ایران نیز به کار گرفته شد. پیش‌بینی‌های پیشرو الگوریتم M8 در ایران نشان دهنده اعلام خطرهایی برای غرب و جنوب‌غرب ایران است.

## ۲ الگوریتم M8

این روش پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه با تحلیل و بررسی زلزله‌خیزی قبل از زمین‌لرزه‌های خیلی بزرگ (بزرگی  $8/0$  ریشتر یا بیشتر) طراحی شد و به همین دلیل نیز نام M8 را برای آن برگزیدند. نسخه اولیه آن (کیلیس-بوروک و کوسوبوکف، ۱۹۸۴) و نسخه اصلی (کیلیس-بوروک و کوسوبوکف، ۱۹۸۷) در ۱۴۳ نقطه مورد آزمایش قرار گرفت که از این تعداد ۱۳۲ نقطه مربوط به رومرکز زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $8/0+$  بین سال‌های ۱۸۵۷ تا ۱۹۸۳ بود. از سال ۱۹۸۶ الگوریتم M8 با عملکرد بازنگرانه با استفاده از پایگاه داده‌های لرزه‌ای منطقه‌ای برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر تا بزرگی  $6/5$  ریشتر به کار گرفته شد (کوسوبوکف، ۱۹۸۶).

الگوریتم M8 بر اساس الگوی فیزیکی ساده‌ای از پیش‌بینی پایه‌گذاری شده است که در اینجا به‌طور خلاصه شرح داده می‌شود. هدف الگوریتم، پیش‌بینی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی  $M_0$  یا بزرگ‌تر است. برای این منظور، گستره زمین‌لرزه‌ای مورد مطالعه توسط مجموعه دایره‌های هم‌پوشانی با قطر  $D(M_0)$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. قطر دایره‌های هم‌پوشانی با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D(M_0) = \{\exp(M_0 - 5/6) + 1\}^0 \quad (1)$$

مقدار  $D(M_0)$  برای  $M_0$  های،  $8/0$ ،  $7/5$ ،  $7/0$  و  $6/5$  به ترتیب برابر است با ۱۳۳۳، ۸۵۴، ۵۶۰، ۳۸۴ کیلومتر است. استفاده از اشکال هندسی (همانند، دایره و مربع) به‌جای ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی برای بررسی منطقه

که حداقل شش مورد از هفت تابع (شامل B) دارای مقادیر بسیار بزرگ در بازه زمانی  $(t-u, t)$  باشند. برای ثبات پیش‌بینی، این شرط بایستی در دو نیم‌سال متوالی  $t$  و  $t+0.5$  برقرار باشد. در پیش‌بینی‌های پیشرو ورود داده‌های جدید به کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها ممکن است موجب مدت زمان TIP کمتر یا بیشتر از ۵ سال شود. مقادیر پیش فرض پارامترهای الگوریتم M8 به صورت زیر است:

$s'=1$  سال و  $g=0.5$ ،  $p=2$ ،  $q=0.2$ ،  $u=3$  سال و  $75$ ٪  $Q$  برای تابع B و  $90$ ٪ برای شش تابع دیگر.

### ۳ پیش‌بینی‌های پیشرو

در این بخش با استفاده از الگوریتم M8، کل ایران را برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آتی (پیش‌بینی پیشرو) مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور، کاتالوگی مشتمل بر همه زمین‌لرزه‌ها در محدوده‌ای به ابعاد ۱۵ الی ۵۰ درجه شمالی و ۳۰ الی ۷۰ درجه شرقی، به گونه‌ای که گستره ایران و محدوده اطراف آن را در بر گیرد، از پایگاه داده‌های جهانی USGS/NEIC استخراج شد. پس‌لرزه‌ها با استفاده از روابط تجربی (کیلیس- بوروک، ۱۹۹۷) از زمین‌لرزه‌های اصلی حذف شدند. بدین ترتیب، کاتالوگ یکدستی از زمین‌لرزه‌های اصلی رخ داده تا اواخر ۲۰۰۴ برای ایران به دست آمد. همان‌طور که ذکر شد، در نسخه استاندارد الگوریتم M8 از جمعیت‌های  $\tilde{N}=10$  و  $\tilde{N}=20$  برای انتخاب حد پایین بزرگی استفاده می‌شود. اما، با توجه به زلزله‌خیزی کمتر ایران نسبت به کمربند زلزله‌خیز اقیانوس آرام که محل کالیبره کردن ثابت‌ها و پارامترهای پیش‌فرض الگوریتم M8 است، در ایران از جمعیت‌های  $\tilde{N}=5$  و  $\tilde{N}=10$  برای انتخاب حد پایین بزرگی استفاده شده است. انتخاب این دو جمعیت در اکثر نقاط ایران برای آزمایش الگوریتم M8 مناسب است. مقدار  $M_0$  یا همان بزرگی زمین‌لرزه مورد انتظار

حتی بدون روند مشخصی باشند. از این‌رو، میانگین‌گیری در بازه‌های زمانی نسبتاً بزرگ (چند سال) باعث نرم شدن و در نتیجه، آشکارتر شدن روند تغییرات زمانی فعالیت‌های پیش‌آگاهی می‌شود. این میانگین‌ها اندازه‌های متفاوتی از شدت جریان زمین‌لرزه، انحراف آن از روند بلندمدت و تجمع یافتن (clustering) زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهند و به صورت زیرند:

•  $N(t)$ ، تعداد زمین‌لرزه‌های اصلی در بازه زمانی و محدوده بزرگی یادشده.

•  $L(t)$ ، انحراف از روند بلندمدت و برابر است با

$$L(t) = N(t) - \frac{N_{cum}(t-s)(t-t_0)}{(t-t_0-s)}$$

که در آن  $N_{cum}(t)$  فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌های اصلی با

بزرگی  $M \geq M_{min}(\tilde{N})$  از شروع توالی  $t_0$  تا  $t$  است.

•  $Z(t)$ ، تمرکز مکانی زمین‌لرزه‌های اصلی  $\{i\}$  با

بزرگی  $(\underline{M}, \overline{M}) = (M_{min}(\tilde{N}), M_0 - g)$  در بازه زمانی  $(t-s, t)$  به صورت نسبت میانگین قطر چشمه  $l$  به میانگین فاصله بین چشمه‌ها  $r$  برآورد می‌شود.

•  $B(t) = \max_{\{i\}} \{b_i\}$  بیشینه تعداد پس‌لرزه‌ها.

در این حالت توالی زمین‌لرزه  $\{i\}$  در دنباله

پنجره زمانی  $(t-s', t)$  و بازه بزرگی  $(\underline{M}, \overline{M}) = (M_0 - p, M_0 - q)$  در نظر گرفته

می‌شود.

توابع  $Z, L, N$  هر کدام دوبار با  $\underline{M} = M_{min}(\tilde{N})$

برای  $\tilde{N}=20$  و  $\tilde{N}=10$  محاسبه می‌شوند. در نتیجه،

توالی زمین‌لرزه‌ها با میانگین‌های باثباتی از هفت تابع ارائه

می‌شود:  $Z, L, N$  (هرکدام دوبار) و  $B$ . در صورتی

یک تابع مقدار خیلی بزرگی خواهد داشت که  $Q$  درصد

از مقادیر قبلی خود بیشتر شود. مقدار  $Q$  برای تابع  $B$

متفاوت از دیگر توابع است. اعلام خطر یا بیشترین احتمال

وقوع (TIP) برای مدت ۵ سال در صورتی اعلام می‌شود

در بر می گیرد، شامل یک دایره است که اعلام خطر آن از اوایل سال ۲۰۰۴ شروع می شود، این اعلان خطر، TIP قیر و کارزین نامیده شده است.

#### ۴ TIP کرمانشاه

همان طور که ذکر شد، یکی از مناطق اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8، گستره کرمانشاه را در بر می گیرد. با اجرای الگوریتم M8 در داخل شبکه ای که غرب کشور را به طور کامل پوشش می دهد، اعلام خطری برای غرب کشور شناسایی شد. برای شبکه  $15 \times 15$  درجه غرب کشور به دلیل نرخ لرزه خیزی زیاد در منطقه زاگرس، مقدار  $M_0$  را می توان  $7/0$  در نظر گرفت. در این حالت، شعاع دایره های هم پوشانی  $280$  کیلومتر است. TIP غرب شامل چهار دایره بررسی است که سه مورد از آنها دارای هم پوشانی تقریباً کاملی اند (شکل ۱). قدس (۱۳۸۱) ناحیه بیشترین هم پوشانی دایره های اعلان خطر را به مثابه گستره پیش بینی شده با الگوریتم M8 در نظر می گیرد. الگوریتم M8 مقادیر توابع را در هر نیم سال محاسبه کرده است که نتایج آن در جدول ۱ برای دایره هم پوشانی به مرکزیت  $33/92$  درجه عرض شمالی و  $47/71$  درجه طول شرقی ارائه شده است. علامت "x" در کنار بعضی از اعداد جدول نشان دهنده مقدار خیلی بزرگ آن تابع در بازه نیم سال مربوطه است. مشاهده می شود که در بازه های زمانی متوالی  $2003/01/31$  و  $2003/08/01$  شش تابع (شامل B) از توابع هفت گانه الگوریتم دارای مقادیر خیلی بزرگی هستند، بنابراین، TIP یا اعلام خطر از  $2003/08/01$  به مدت ۵ سال شروع می شود.

در جدول ۱  $M_{max}$  بیانگر بیشینه بزرگی زمین لرزه در نیم سال مربوطه است. g نشان دهنده این است که چند گروه از چهار گروه تابع  $Z, L, N$  و B دارای مقدار خیلی بزرگ اند و h نشان دهنده تعداد توابعی است که دارای مقادیر خیلی بزرگ در نیم سال مربوطه هستند. برای اعلام خطر لازم است که  $g=4$  و  $h$  حداقل ۶ باشد.

الگوریتم M8 برای پیش بینی، در اکثر نقاط ایران  $7/5$  و در زاگرس به دلیل زلزله خیزی بالا  $7/0$  انتخاب شد. این انتخاب با توجه به سوابق زلزله خیزی کشورمان و همچنین محدودیت کامل بودن داده ها صورت می گیرد. کامل بودن کاتالوگ زمین لرزه ها در محدوده بزرگی خاص به این معناست که نمودار فراوانی تجمعی زمین لرزه ها بر حسب بزرگی در آن محدوده از رابطه گوتنبرگ-ریشتر تبعیت کند. به مثابه مثال، اگر پیروی داده ها از رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای زمین لرزه های بالاتر از ۴ باشد، می گوئیم که داده ها برای زمین لرزه های بزرگ تر از ۴ کامل است. با وجود این، تاریخ زلزله خیزی ایران شاهد زمین لرزه های بزرگ تر از  $8/0$  نبوده است و اکثر زمین لرزه های مخرب ایران کوچک تر از  $8/0$  هستند و برای  $M_0 < 7/0$  نیز به دلیل این که کاتالوگ زمین لرزه ها بایستی از درجه کامل بودن بالای برای زمین لرزه های بزرگ تر از ۳ (حداقل در طی دو دهه اخیر) برخوردار باشد، لذا، اجرای الگوریتم M8 برای این محدوده از بزرگی ها در حال حاضر ایران میسر نیست.

برای اجرای الگوریتم M8، گستره ایران به شبکه هایی با ابعاد  $15 \times 15$  درجه متشکل از  $18 \times 18$  نقطه به فواصل مساوی از همدیگر تقسیم بندی می شود. آرایه  $18 \times 18$  نقطه ای، مراکز دایره های هم پوشانی را تشکیل می دهند. در هر صورت، هدف ما در این تحقیق این است که در داخل شبکه متراکمی از نقاط به مثابه مراکز دایره های هم پوشانی، الگوریتم M8 را برای کل ایران مورد آزمایش قرار دهیم.

نتایج حاصل از پیش بینی، نشان دهنده دو دسته از TIP ها است. دسته اول شامل چهار دایره هم پوشانی است که اعلام خطر آنها از اواسط سال ۲۰۰۳ شروع می شود و غرب کشور را در بر می گیرد. این TIP به نام TIP کرمانشاه نام گذاری شده است. دسته دوم از TIP های شناسایی شده که بخش هایی از جنوب غرب کشور را

جدول ۱. مقادیر توابع هفت‌گانه الگوریتم M8 برای پیش‌بینی پیش‌رو، در غرب کشور، در دایره به مختصات ۳۳/۹۲ درجه عرض شمالی و ۴۷/۷۱ درجه طول شرقی.

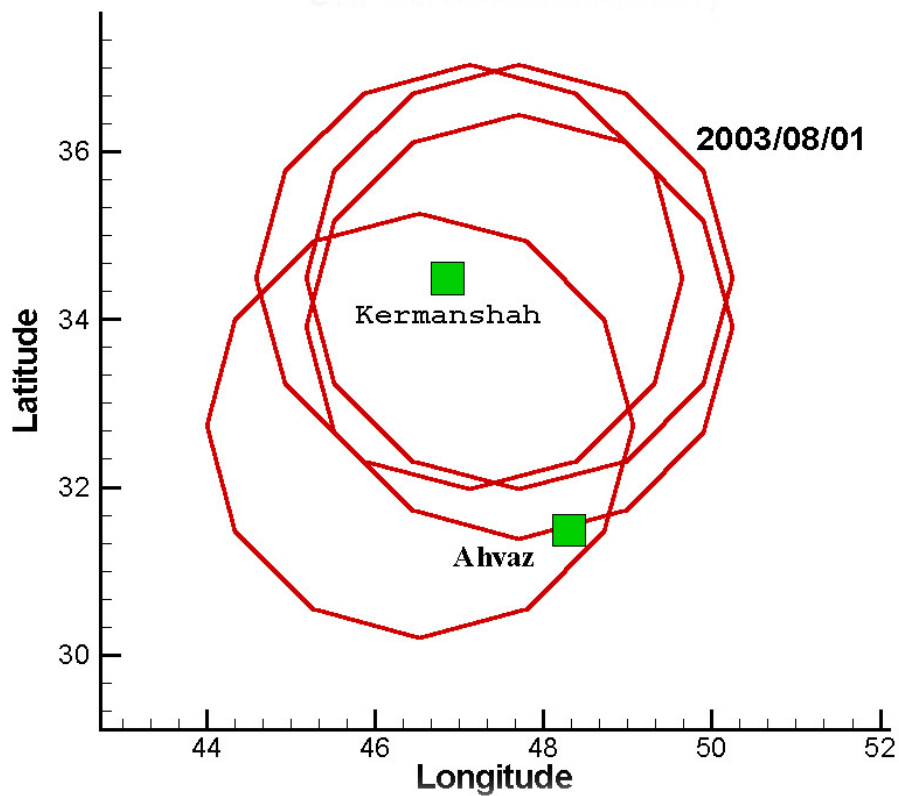
**CTIP (Current Times of Increased Probability) (33.92: 47.71)\*(2003/08/01-2008/08/01)**  
**First quake: 1963/03/24 12:44 34.30 47.80 10 5.30**

g:h	Mmax	Date	N(5)	N(10)	L(5)	L(10)	Z(5)	Z(10)	B
1:1	4.8	1973/01/30	39	26	13	6	507	528	4
0:0	5.2	1973/08/01	35	24	5	2	502	526	0
0:0	5.2	1974/01/30	39	24	9	1	502	534	1
0:0	.0	1974/08/01	34	20	1	-5	468	498	1
0:0	5.0	1975/01/31	38	22	6	-2	481	515	0
0:0	4.7	1975/08/01	40	22	9	-1	480	515	0
0:0	4.9	1976/01/31	36	19	3	-5	456	493	-
0:0	4.7	1976/08/01	38	19	6	-5	455	493	-
0:0	5.5	1977/01/30	39	19	8	-5	473	520	1
1:1	5.8	1977/08/01	40	23	6	-1	540	599	9*
1:1	4.7	1978/01/30	40	23	6	0	527	583	9*
1:1	4.8	1978/08/01	40	23	5	-1	515	562	-
1:1	6.2	1979/01/31	43	24	9	0	568	641	2
1:1	5.1	1979/08/01	45	25	12	2	569	637	2
1:1	4.9	1980/01/31	39	23	4	0	558	619	0
1:1	4.7	1980/08/01	44	25	10	2	559	617	-
0:0	5.8	1981/01/30	42	24	7	1	583	646	3
0:0	4.7	1981/08/01	42	24	6	1	584	646	3
0:0	5.1	1982/01/30	44	26	9	3	591	646	0
1:2	5.0	1982/08/01	49	31	14	9	608*	650*	0
1:2	4.9	1983/01/31	50	33	15	11	597	630	0
2:3	5.6	1983/08/01	45	30	8	6	576	605	6*
2:3	5.1	1984/01/31	49	34	13	10	594	619	6*
2:3	4.7	1984/08/01	47	33	10	9	591	616	0
2:3	5.0	1985/01/30	44	33	6	9	546	555	0
1:1	4.9	1985/08/01	47	37	9	13	552	559	0
1:1	4.8	1986/01/30	49	38	12	14	553	559	-
1:1	4.8	1986/08/01	46	37	8	13	553	559	-
0:0	4.7	1987/01/31	47	37	9	13	525	528	-
0:0	4.9	1987/08/01	49	38	11	14	532	536	-
1:1	5.3	1988/01/31	60	41	22	17	546	552	10*
1:1	4.9	1988/08/01	60	42	21	17	545	552	10*
1:1	4.8	1989/01/30	60	41	21	15	541	547	-
1:1	5.4	1989/08/01	64	41	25	15	527	530	1
1:1	4.7	1990/01/30	63	40	23	13	515	515	1
3:3	5.1	1990/08/01	71	46*	31	19*	537	541	4
3:4	5.3	1991/01/31	74	45*	35*	18*	542	545	4
2:3	4.7	1991/08/01	72	42	32	14	529	532	1
2:4	4.9	1992/01/31	77*	43	37*	15	531	533	-
2:4	4.9	1992/08/01	78*	44	38*	17	534	536	-
2:4	4.8	1993/01/30	78*	44	38*	17	534	539	-
2:4	4.8	1993/08/01	77*	44	36*	17	532	537	-
2:2	4.6	1994/01/30	65	39	22	11	502	508	-
2:2	5.6	1994/08/01	63	35	19	6	504	513	2
2:2	4.7	1995/01/31	63	35	19	6	502	510	2
2:2	5.0	1995/08/01	68	35	23	6	498	496	1
2:2	5.0	1996/01/31	70	36	25	6	507	510	1

ادامه جدول ۱

0:0	4.4	1996/08/01	64	28	17	-2	476	472	0
0:0	4.5	1997/01/30	62	28	15	-2	465	455	-
0:0	4.7	1997/08/01	63	29	16	-1	470	460	-
0:0	4.9	1998/01/30	62	32	14	1	481	476	-
0:0	4.4	1998/08/01	62	30	14	0	473	467	-
0:0	5.6	1999/01/31	66	36	18	5	529	540	0
0:0	4.5	1999/08/01	69	35	21	4	527	533	0
0:0	4.7	2000/01/31	72	36	24	6	532	536	-
0:0	4.7	2000/08/01	69	34	21	4	511	509	-
0:0	4.6	2001/01/30	68	33	20	3	506	504	-
0:0	5.4	2001/08/01	60	32	11	1	512	523	2
0:0	5.0	2002/01/30	65	35	15	4	519	521	2
2:2	6.5	2002/08/01	73	42	23	11	611*	640	14*
4:6	5.6	2003/01/31	77*	48*	27	18*	644*	675*	14*
4:6	4.6	2003/08/01	76	46*	26	15	641*	674*	9*
***:*	5.0	2004/01/31	74	43	24	12	633*	670*	16*
***:*	4.8	2004/08/01	86*	51*	36*	20*	644*	673*	16*

Last quake: 2004/07/02 12:56 35.57 48.91 57 4.00



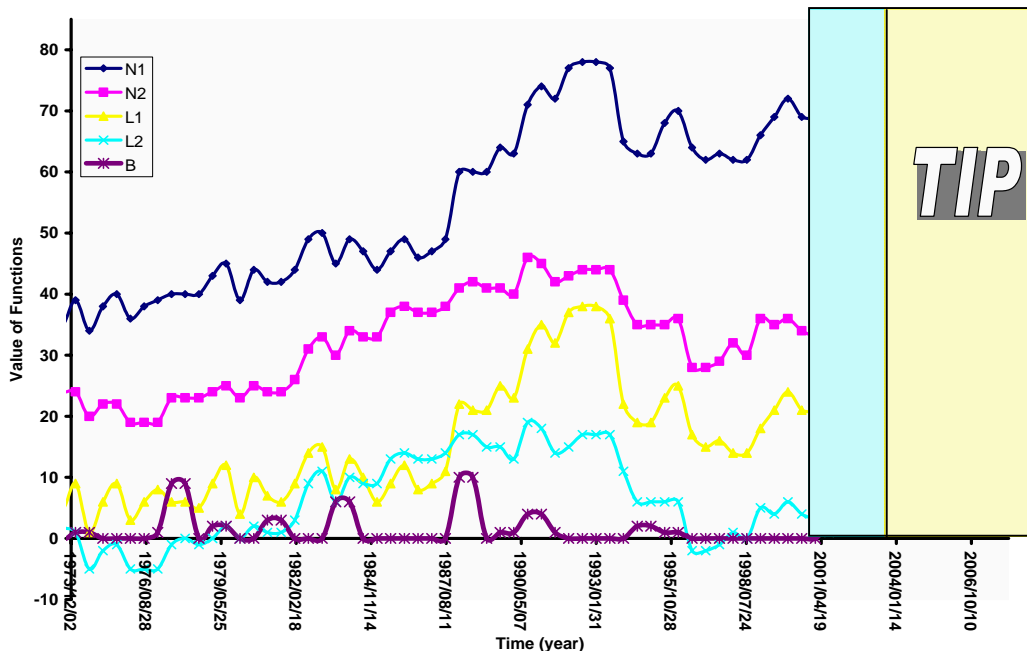
شکل ۱. دایره‌های اعلام خطر (TIP) تعیین شده با الگوریتم M8 برای غرب کشور ( $M_0=7$ ).

TIP یا اعلام خطر را نشان می‌دهد. الگوریتم M8 مقادیر توابع را برای دایره یادشده در هر نیم‌سال محاسبه کرده است که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. علامت "×" در کنار بعضی از اعداد جدول نشان‌دهنده مقدار خیلی بزرگ آن تابع در بازه نیم‌سال مربوطه است. ملاحظه می‌شود که در بازه‌های زمانی متوالی ۲۰۰۳/۰۸/۰۱ و ۲۰۰۴/۰۱/۳۱ همه ۷ تابع از توابع هفت‌گانه الگوریتم دارای مقادیر خیلی بزرگ‌اند، بنابراین، شروع اعلام خطر یا TIP از ۲۰۰۴/۰۱/۳۱ است. شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر توابع هفت‌گانه موجود در جدول ۲ را در مدت زمان تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند. مستطیل سمت چپ شکل‌های ۵ و ۶ بازه سه ساله قبل از شروع TIP را نشان می‌دهد. در این بازه زمانی، معکوس‌شدگی فعالیت لرزه‌ای قابل تشخیص است. مستطیل سمت راست نیز بازه زمانی TIP موردنظر، که از ۲۰۰۴/۰۱/۳۱ شروع و تا ۲۰۰۹/۰۱/۳۱ ادامه دارد را مشخص می‌کند.

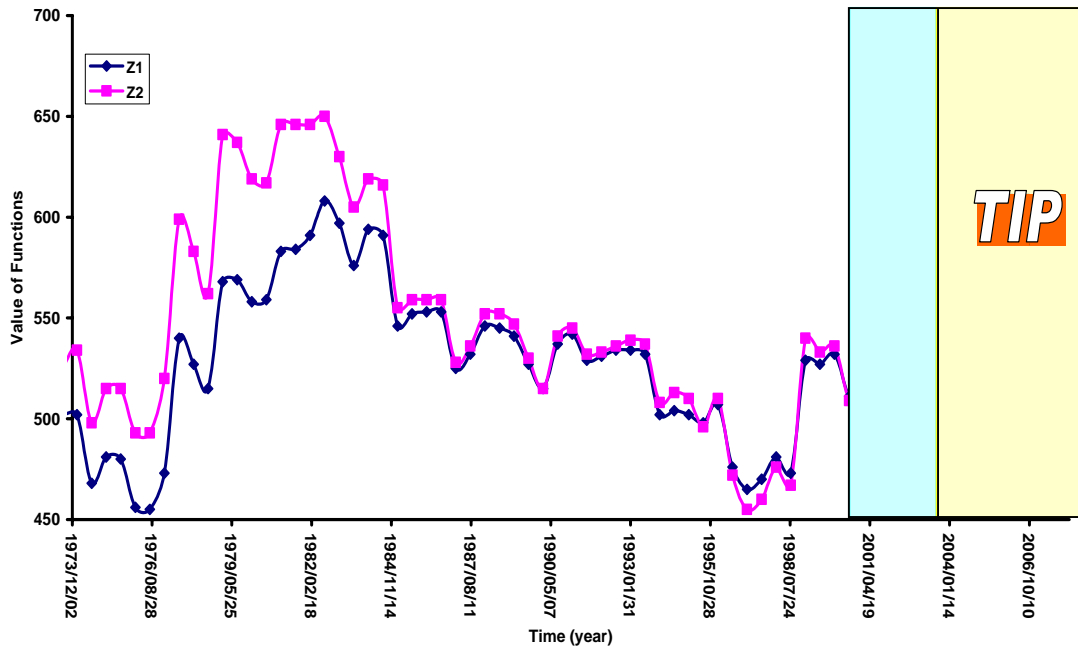
شکل‌های ۲ و ۳ مقادیر توابع هفت‌گانه موجود در جدول ۱ را در مدت زمان تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند. مستطیل سمت چپ در شکل‌های ۲ و ۳، بازه سه ساله قبل از شروع TIP را نشان می‌دهد. در این بازه زمانی، معکوس‌شدگی فعالیت لرزه‌ای کاملاً قابل تشخیص است و مستطیل سمت راست، بازه ۵ ساله TIP مورد نظر را که از ۲۰۰۳/۰۸/۰۱ آغاز و تا ۲۰۰۸/۰۸/۰۱ ادامه دارد نشان می‌دهد.

### ۵ TIP قیر و کارزین

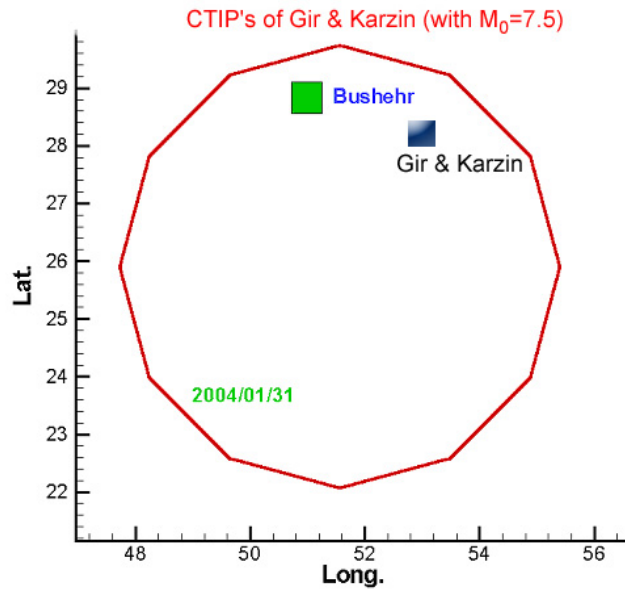
دسته دوم TIP‌های به‌دست آمده مربوط به جنوب غرب کشور است. مقدار  $M_0$  برای جنوب غرب کشور ۷/۵ در نظر گرفته شده است. از این رو، شعاع دایره‌های هم‌پوشانی ۴۲۷ کیلومتر است. با اجرای الگوریتم M8 در داخل شبکه‌ای که جنوب غرب و جنوب کشور را به‌طور کامل پوشش داده بود، TIP‌های برای جنوب غرب کشور با الگوریتم M8 شناسایی شد. شکل ۴ نشان می‌دهد که در این حالت، فقط یکی از دایره‌های بررسی به مرکزیت ۲۶/۲۶ درجه عرض شمالی و ۵۱/۰۹ درجه طول شرقی،



شکل ۲. نمودار مقادیر توابع N1, N2, L1, L2 و B برای منطقه غرب کشور.

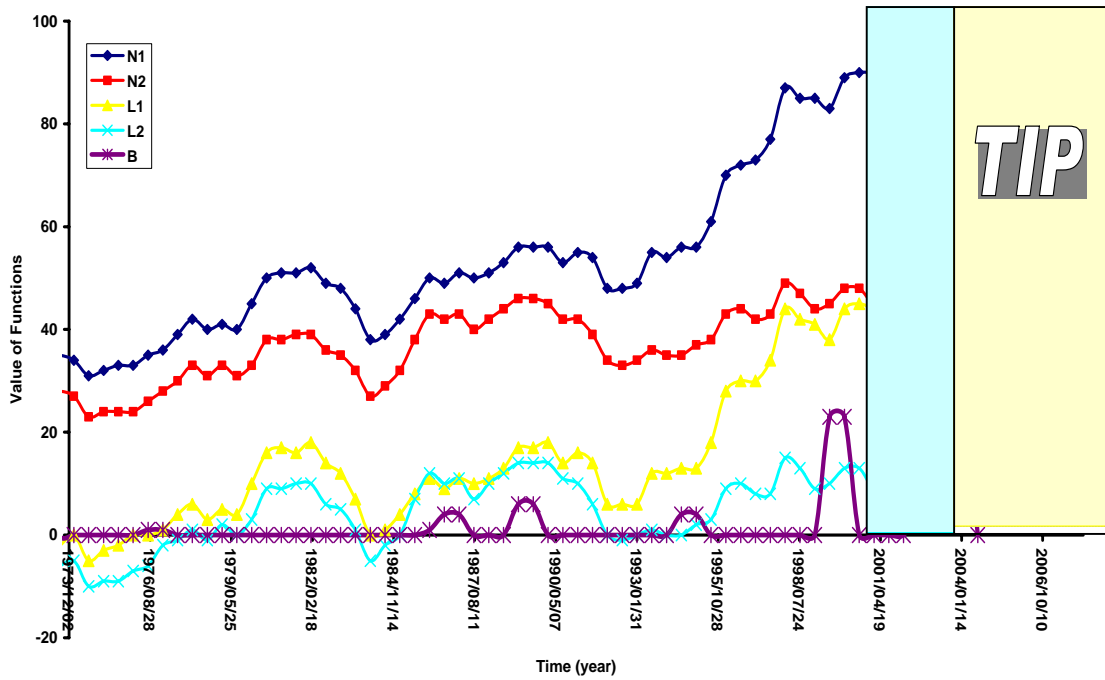


شکل ۳. نمودار مقادیر توابع  $Z_1$  و  $Z_2$  برای منطقه غرب کشور.

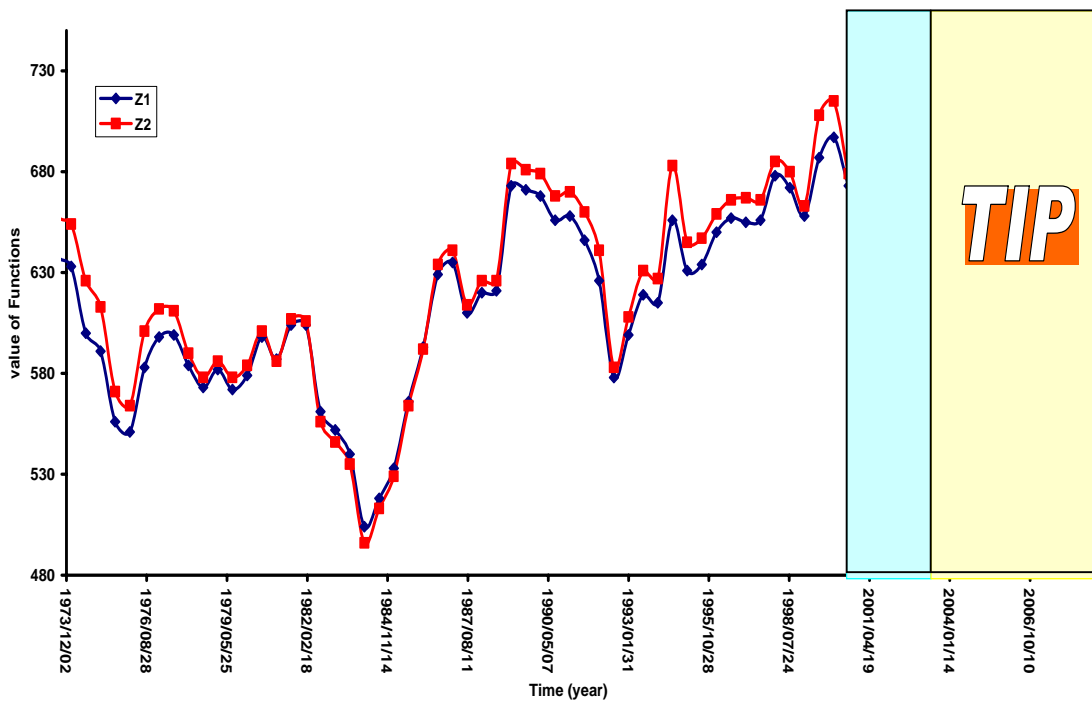


شکل ۴. دایره اعلام خطر (TIP) تعیین شده توسط الگوریتم M8 برای جنوب غرب کشور ( $M_0=7.5$ ).





شکل ۵. نمودار مقادیر توابع N1, N2, L1, L2 و B برای منطقه جنوب غرب کشور.



شکل ۶. نمودار مقادیر توابع Z1 و Z2 برای جنوب غرب کشور.

جدول ۲. مقادیر توابع هفت‌گانه الگوریتم M8 برای پیش‌بینی پیشرو در جنوب غرب کشور در دایره به مختصات ۲۶/۲۶ درجه عرض شمالی و ۵۱/۰۹ درجه طول شرقی.

**CTIP(26.26: 51.09)\*(2004/01/31-2009/01/31)**  
**First quake: 1963/02/08 6: 3 26.50 55.20 33 4.10**

g:h	Mmax	Date	N(5)	N(10)	L(5)	L(10)	Z(5)	Z(10)	B
2:3	4.4	1973/01/30	35	28	-1	-6	671	698*	17*
2:3	5.0	1973/08/01	35	28	-2	-6	639	659	-
2:3	.0	1974/01/30	34	27	0	-5	633	654	-
2:3	4.4	1974/08/01	31	23	-5	-10	600	626	-
2:3	5.3	1975/01/31	32	24	-3	-9	591	613	-
2:2	4.9	1975/08/01	33	24	-2	-9	556	571	-
0:0	4.7	1976/01/31	33	24	0	-7	551	564	-
0:0	6.0	1976/08/01	35	26	0	-6	583	601	1
0:0	5.2	1977/01/30	36	28	1	-2	598	612	1
0:0	4.9	1977/08/01	39	30	4	-1	599	611	-
0:0	5.6	1978/01/30	42	33	6	1	584	590	0
0:0	4.8	1978/08/01	40	31	3	-1	573	578	0
0:0	4.9	1979/01/31	41	33	5	2	582	586	-
0:0	4.7	1979/08/01	40	31	4	0	572	578	-
0:0	4.8	1980/01/31	45	33	10	3	579	584	-
0:0	5.0	1980/08/01	50	38	16	9	598	601	-
0:0	4.9	1981/01/30	51	38	17	9	587	586	-
0:0	5.4	1981/08/01	51	39	16	10	604	607	-
0:0	4.6	1982/01/30	52	39	18	10	604	606	-
0:0	4.9	1982/08/01	49	36	14	6	561	556	-
0:0	4.9	1983/01/31	48	35	12	5	552	546	-
0:0	5.2	1983/08/01	44	32	7	1	540	535	-
0:0	4.8	1984/01/31	38	27	0	-5	504	496	-
0:0	5.2	1984/08/01	39	29	1	-2	518	513	-
0:0	5.1	1985/01/30	42	32	4	0	533	529	-
0:0	5.3	1985/08/01	46	38	8	7	566	564	-
0:0	5.5	1986/01/30	50	43	11	12	593	592	1
0:0	5.7	1986/08/01	49	42	9	10	629	634	4
0:0	5.1	1987/01/31	51	43	11	11	635	641	4
0:0	4.6	1987/08/01	50	40	10	7	610	614	-
0:0	5.0	1988/01/31	51	42	11	10	620	626	-
0:0	4.9	1988/08/01	53	44	13	12	621	626	-
0:0	6.1	1989/01/30	56	46	17	14	673	684	6
0:0	4.9	1989/08/01	56	46	17	14	671	681	6
0:0	4.5	1990/01/30	56	45	18	14	668	679	-
0:0	4.8	1990/08/01	53	42	14	11	656	668	-
0:0	5.4	1991/01/31	55	42	16	10	658	670	-
0:0	5.1	1991/08/01	54	39	14	6	646	660	-
0:0	5.0	1992/01/31	48	34	6	0	626	641	-
0:0	4.8	1992/08/01	48	33	6	-1	578	583	-
0:0	5.4	1993/01/30	49	34	6	0	599	608	-
0:0	5.2	1993/08/01	55	36	12	1	619	631	-
0:0	4.9	1994/01/30	54	35	12	0	615	627	-
0:0	6.1	1994/08/01	56	35	13	0	656	683	4
0:0	5.3	1995/01/31	56	37	13	2	631	645	4
0:0	5.0	1995/08/01	61	38	18	3	634	647	-
0:0	4.9	1996/01/31	70	43	28	9	650	659	-

ادامه جدول ۲

0:0	5.2	1996/08/01	72	44	30	10	657	666	-
0:0	5.4	1997/01/30	73	42	30	8	655	667	-
0:0	5.1	1997/08/01	77	43	34	8	656	666	-
2:2	5.3	1998/01/30	87	49*	44	15*	678	685	-
2:2	4.6	1998/08/01	85	47	42	13	672	680	-
2:2	5.4	1999/01/31	85	44	41	9	658	663-	-
4:5	6.3	1999/08/01	83	45	38	10	687*	708*	23*
4:5	5.3	2000/01/31	89	48	44	13	697*	715*	23*
4:7	5.1	2000/08/01	90*	48	45*	13	673	679	-
4:5	5.0	2001/01/30	90*	45	44	9	655	654	-
4:5	5.1	2001/08/01	90*	47	44	11	660	658	-
4:5	5.2	2002/01/30	87	47	39	11	656	656	-
4:7	5.6	2002/08/01	96*	52*	49*	16*	678	678	4
2:4	5.2	2003/01/31	93*	52*	45*	16*	672	673	4
4:7	5.9	2003/08/01	89	51*	40	15*	690*	702*	30*
4:7	5.4	2004/01/31	82	48	31	11	683*	698*	30*
***:*	5.0	2004/08/01	87	51*	36	14	693*	706*	-
Last quake :		2004/07/07	18:46	27.35	53.40	65	4.50		

قدس، ع.، ۱۳۸۱، کاهش عدم قطعیت مکانی الگوریتم

پیش‌بینی میان‌مدت زلزله، M8 و کاربرد آن برای

زلزله منجیل - رودبار، ششمین همایش انجمن

زمین‌شناسی ایران، دانشگاه کرمان.

Keilis-Borok, V. I., and Kossobokov, V. G., 1984, A complex of long-term precursors for the strongest earthquakes of the world. In Proceedings 27th Geological Congress, **61**, 56-66, Nauka, Moscow.

Keilis-Borok, V. I., and Kossobokov, V. G., 1987, Periods of high probability of occurrence of the world's strongest earthquakes: Computational Seismology 19, Allerton Press Inc., 45-53.

Keilis-Borok, V. I., and Kossobokov, V. G., 1990, Premonitory activation of earthquake flow: Algorithm M8. Phys. Earth Planet. Int., **61**, 73-83.

Kossobokov, V. G., 1986, The test of algorithm M8. In Sadovsky, A. M. A. (Ed.), Algorithms of Long-term Earthquake Prediction: CERESIS, Lima, Peru, pp. 42-52.

Kossobokov, V. G., 1997, User Manual for M8. In Healy, J. H., Keilis-Borok, V. I., Lee, W. H. K., editors, Algorithms for Earthquake Statistics and Prediction: IASPEI Software Library, 6. Seismol. Soc. Am., El Cerrito, CA. 30 pp.

Kossobokov, V. G., and Shebalin, P., 2003, Earthquake Prediction. In: Keilis-Borok, V. I.,

## ۶ نتیجه‌گیری

شناخت الگوی زلزله‌خیزی از مهم‌ترین روش‌های

پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها است. الگوریتم‌های معتبری براساس

پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای طراحی شده است که M8 یکی

از معتبرترین آنها است. مقدار  $M_0$  برای آزمایش

الگوریتم M8 در ایران برای اکثر مناطق ۷/۵ و در زاگرس به دلیل زلزله‌خیزی بالا ۷/۰ در نظر گرفته شد.

پیش‌بینی‌های پیشرو صورت گرفته برای سراسر گستره

ایران با استفاده از الگوریتم M8 حاکی از اعلام

خطرهایی برای مناطق غرب و جنوب‌غرب کشور است.

اعلام خطر غرب کشور با  $M_0=7/0$  از اواسط ۲۰۰۳

شروع و تا اواسط ۲۰۰۸ میلادی ادامه دارد و همچنین،

اعلام خطر جنوب‌غرب کشور با  $M_0=7/5$  از اوایل ۲۰۰۴

شروع و تا اوایل ۲۰۰۹ میلادی طول می‌کشد.

## منابع

شادمنامن، ن.، ۱۳۸۳، الگوی لرزه‌خیزی کلان زمین‌لرزه‌ها

و پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه در ایران، پایان‌نامه

کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک

دانشگاه تهران.

Soloviev, A. A., editors, Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction: Springer.

Shebalin, P. N., 1992, Automatic duplicate identification in set of earthquake catalogues merged together: U. S. Geol. Surv. Open-File Report 92-401, Appendix II.