

بررسی عملکرد الگوریتم M8 در پیش‌بینی زلزله‌های بزرگ باختر فلات ایران

مسعود مجرب^۱، حسین معاریان^۲، مهدی زارع^۳ و ولادیمیر کوسوبوکوف^۴

^۱دکتر، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۴استاد، مؤسسه بین‌المللی پیش‌بینی زلزله و ژئوفیزیک ریاضی، مسکو، روسیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۱۹

چکیده

زلزله مورخ ۲۰۱۱/۱۰/۲۳ ترکیه در نزدیکی شهر وان با حدود ۶۰۰ کشته، باعث خسارات زیادی در شهرهای ارجیش، وان، مرادیه و چالدران شد. مطالعه زلزله‌های دستگاهی سده بیستم و تاریخی منطقه نشان داد که منطقه خاور صفحه آتاتولی و شمال باختر فلات ایران لرزه‌خیز بوده و مهم‌ترین زلزله اخیر منطقه در سال ۲۴ نوامبر ۱۹۷۶ و در چالدران رخ داده است. در این مقاله مسئله پیش‌بینی زلزله در محدوده باختر فلات ایران و به صورت بازنگرانه مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های پیش‌بینی زلزله به‌طور عمده به دو شاخه پیش‌نشاندگی و استفاده از الگوریتم‌های شناسایی الگو تقسیم می‌شوند. در این مطالعه از روش الگوریتم M8 که بر پایه شناسایی الگو کار می‌کند استفاده شده است. بدین منظور یک شبکه ۴۹ نقطه در محدوده مورد مطالعه طراحی شد. الگوریتم M8 برای نقاط شبکه اجرا شد و چهار منطقه نزدیک به هم که دارای همپوشانی نیز بودند، به عنوان محدوده‌های هشدار معرفی شدند. این مطالعه نشان داد که زلزله اخیر وان با پنجره زمانی ۲۰۰۸/۱/۱ تا ۲۰۱۲/۱۲/۳۰، پنجره مکانی به شعاع ۲۸۱ کیلومتر و برای بزرگای بیشتر از ۷ قابلیت هشدار پیش از رخداد را داشته است. همچنین کاربرد پیشرو الگوریتم نشان داد که از ۲۰۱۱/۷/۳۰ به مدت ۵ سال هیچ افزایش احتمال رخدادی برای بزرگای ۷ دیده نشده است. این مطالعه نشان داد که الگوریتم M8 یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های پیش‌بینی است که می‌توان برای سرتاسر خاورمیانه به کار گرفت. به این ترتیب می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که الگوریتم‌های مبتنی بر شناسایی الگو نقش مهمی را در کاهش خسارات جانی و مالی در رخدادهای لرزه‌ای بازی می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی زلزله، فلات ایران- آتاتولی خاوری، شناسایی الگو، الگوریتم M8، زمان افزایش احتمال رخداد.

*نویسنده مسئول: مسعود مجرب

E-mail: mmojarab@ut.ac.ir

۱- پیش‌گفتار

زلزله تنها عامل بروز خسارات جانی و مالی طبیعی نیست، ولی ۶ زلزله مخرب رخ داده در جهان، در میان ۲۰ مخاطره طبیعی و مخرب دنیا در قرن ۲۰ بوده‌اند. این زلزله‌ها، جمعاً ۳۵٪ از زیان‌های اقتصادی را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین زیان‌های ناشی از سیل ۳۰٪ و توفان‌ها ۲۸٪ بوده است. ۷٪ باقیمانده مربوط به دیگر مخاطرات است (CAT-i Service, 2000).

زمین‌لرزه اول آبان ۱۳۹۰ وان در ترکیه با بزرگای گشتاوری ۷/۳ بهانه‌ای برای مطالعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی زمین‌لرزه در باختر فلات ایران و آتاتولی خاوری شد. این زمین‌لرزه باعث کشته شدن بیش از ۶۰۰ نفر و همچنین باعث خرابی در شهرهای وان، ارجیش، مرادیه و چالدران شد (Zare et al., 2011). ژرفای اولیه حدود ۸ کیلومتر برآورد شد (USGS, 2011). شهرهای دیاربکر، آگری و ارزوم در ترکیه و شهرهای سیه‌چشمه، خوی و ماکو در ایران به شدت این زلزله را احساس کردند (Emre et al., 2011). این زلزله حاصل عملکرد گسل وان با طول ۴۰ کیلومتر و شیئی به سمت شمال بوده است (شکل ۱). با نگاهی به پراکندگی زلزله‌ها چنین دریافت می‌شود، بیشتر زلزله‌ها در روند شمال خاوری - جنوب باختری و به صورت خوشه‌های نامنظم رخ داده‌اند. مهم‌ترین زلزله سده اخیر در این پهنه لرزه‌خیز در ۳۵ سال پیش و در نزدیکی چالدران در ۲۴ نوامبر ۱۹۷۶ با بزرگای ۷/۱ روی داد که باعث کشته شدن بیش از ۵۰۰۰ نفر شد (Gulkan et al., 1978). جدول ۱ آمار لرزه‌خیزی تاریخی خاور آتاتولی را نشان می‌دهد. در محدوده شهر وان در سال‌های ۱۹۴۵ و ۱۹۷۲ به ترتیب زلزله‌هایی با بزرگای ۴/۸ و ۴/۹ رخ داده است. همچنین زلزله‌های مهم سلماس با بزرگای ۷/۲ در سال ۱۹۳۰ و چالدران با بزرگای ۷/۱ در سال ۱۹۷۶ از رویدادهای تاریخی و مخرب مهم منطقه بوده است.

با مطالعه و بررسی لرزه‌خیزی منطقه آتاتولی خاوری به این نتیجه می‌رسیم که این منطقه پتانسیل تولید زلزله بالای ۷ را داشته است. بدین ترتیب این پژوهش قصد دارد تا با به‌کارگیری الگوریتم M8 که روشی است مبتنی بر روش‌های شناسایی الگو به

مسئله پیش‌بینی زلزله در آینده و با نگرش ویژه بر زلزله وان بپردازد. زمانی می‌توان گفت زلزله‌ای پیش‌بینی می‌شود که از نظر زمانی، بزرگای مکان زلزله را پیش‌بینی کرده باشیم (Allen et al., 1976).

مطالعه بر روی الگوریتم‌ها و روش‌های پیش‌بینی با روش‌های شناسایی الگو منجر به ارائه روش‌های تشخیص الگوی لرزه‌خیزی و برآورد زلزله بعدی در یک پنجره زمانی، مکانی و بزرگای شده است. یکی از مهم‌ترین تقسیم‌بندی‌های ارائه شده در رابطه با طبقه‌بندی زمانی و مکانی پیش‌بینی در جدول ۲ ارائه شده است.

۲- روش‌شناسی الگوریتم M8

ریاضیدانان و ژئوفیزیک‌دانان مؤسسه بین‌المللی پیش‌بینی زلزله و ژئوفیزیک ریاضی مسکو، یک روش کاربردی که بر پایه روش‌های شناسایی الگو استوار است، ارائه کرده‌اند. Kossobokov & Keilis-Borok (1986) روش M8 را که توانسته است چندین زلزله مهم دنیا را پیش‌بینی کند، ارائه کرده‌اند. همچنین این روش در انجمن پیش‌بینی زلزله آمریکا ارائه شد و توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا نیز با موفقیت ارزیابی شد (Kossobokov, 1997; Peresan et al., 2005).

روش M8 برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۸ طراحی شد و به همین دلیل به این نام معرفی شد. نسخه اولیه آن (Keilis-Borok & Kossobokov, 1984) و نسخه اصلی آن (Keilis-Borok & Kossobokov, 1987) در ۱۴۳ نقطه مورد آزمایش قرار گرفت که از این تعداد ۱۳۲ نقطه مربوط به رومرکز زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۸+ بین سال‌های ۱۸۵۷ تا ۱۹۸۳ بود. از سال ۱۹۸۶ الگوریتم M8 با عملکرد بازنگرانه برای زلزله‌های ۶/۵ نیز به کار گرفته شد (Kossobokov, 1986).

الگوریتم M8، برپایه الگوی فیزیکی ساده‌ای از پیش‌بینی، پایه‌گذاری شده است. هدف این الگوریتم، پیش‌بینی زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای M_0 یا بزرگ‌تر است. برای این منظور، گستره زمین‌لرزه‌ای مورد مطالعه توسط مجموعه دایره‌های همپوشانی با

CAT10، CAT20a، CAT10a و CATMS که کاتالوگ‌های CAT20 و CAT10 کاتالوگ‌های اصلی الگوریتم M8 هستند. برای هر دایره بررسی ۲ مجموعه کاتالوگ لرزه‌ای از زلزله‌های اصلی تهیه می‌شود. در ادامه شروط کامل بودن این دو کاتالوگ بررسی می‌شود (Kossobokov, 1997).

CAT20: حد پایینی بزرگ‌ا طوری انتخاب می‌شود که به‌طور میانگین ۲۰ زلزله در سال در کاتالوگ موجود باشد. به عبارتی برای آنالیز ۳۰ سال الگوریتم باید بزرگ‌ا انتخاب شود که ۶۰۰ زلزله را در کاتالوگ لرزه‌خیزی تأمین کند. بنابراین اگر در دوایر بررسی برای هر سال کمتر از ۲۰ زلزله موجود بود، برای ادامه کار باید تصمیم‌گیری کرد که آیا می‌توان ادامه کار داد یا نه. در هر صورت شمار زلزله‌ها نباید از ۱۶ عدد در سال کمتر شود (Kossobokov, 1997).

CAT10: انتخاب حد پایینی بزرگ‌ا به‌گونه‌ای است که به‌طور متوسط ۱۰ رویداد در هر سال در کاتالوگ لرزه‌خیزی موجود باشد. این دو جمعیت لرزه‌ای برای هر دایره بررسی CI محاسبه می‌شوند. نهایتاً این امکان وجود دارد که با تغییر سطح لرزه‌خیزی برای هر دایره بررسی بزرگ‌ا حد پایینی نیز تغییر کند (Kossobokov, 1997).

توابع برای هر ۶ ماه محاسبه می‌شوند به‌طوری که زمان انتهایی برابر است با $t_i = t_0 + (i \text{ half-years})$. حال اگر X_i برابر با تعداد زلزله‌ها در ۶ ماه در نظر گرفته شود به‌طوری که t_i انتهای بازه زمانی باشد و همچنین S_i را برابر با $\sum_{j=1}^{0.46M_{ij}}$ در جایی که M_{ij} برابر با بزرگ‌اهای تمامی زلزله‌های اصلی از فاصله نیم سال i باشد، می‌توان روابط زیر را برای توابع هفتگانه ارائه داد (Kossobokov, 1997).

$$F1(t_i) = X_i - 11 + X_i - 10 + \dots + X_i \quad (2)$$

$$F2(t_i) = X_i - 11 + X_i - 10 + \dots + X_i \quad (3)$$

$$F3(t_i) = F1(t_i) - (X_1 + X_2 + \dots + X_i - 11) \cdot 12 / (i - 12) \quad (4)$$

$$F4(t_i) = F2(t_i) - (X_1 + X_2 + \dots + X_i - 11) \cdot 12 / (i - 12) \quad (5)$$

$$F5(t_i) = (S_i - 11 + S_i - 10 + \dots + S_i) / (X_i - 11 + X_i - 10 + \dots + X_i) \cdot 2/3 \quad (6)$$

$$F6(t_i) = (S_i - 11 + S_i - 10 + \dots + S_i) / (X_i - 11 + X_i - 10 + \dots + X_i) \cdot 2/3 \quad (7)$$

$$F7(t_i) = \text{بزرگ‌ترین پس لرزه در سال‌های گذشته} \quad (8)$$

توابع هفتگانه $F1(t)$ تا $F7(t)$ برای اعلام هشدار و یا زمان افزایش احتمال خطر، TIP (Time of increasing probability)، محاسبه می‌شوند. برای زلزله اصلی مورد انتظار که همان بزرگ‌ای M_0 (و یا بالاتر) در یک محدوده بررسی CI است، اعلام خطر می‌کند. تصمیم‌گیری برای زمان اعلام خطر این است که هرگاه ۶ تابع اول $F1(t)$ تا $F6(t)$ بالای ۱۰ درصد مقادیر پیشین خود شدند به‌عنوان ناهنجاری معرفی شوند. تابع $F7(t)$ نیز زمانی به وضعیت بحرانی می‌رسد که مقدار آن به ۲۵ درصد بالای مقادیر توابع پیشین رسیده باشد (Kossobokov, 1997).

زمانی در یک منطقه مورد مطالعه CI می‌توان TIP را اعلام کرد که ۵ عدد از ۶ تابع اول و تابع ۷ در سه سال پیش از زمان بررسی، بی‌هنجاری نشان داده باشند و همچنین این حالت در دو نیم سال متوالی برقرار باشد. بنابراین یک TIP در دایره مورد بررسی اعلام می‌شود که برابر است با بازه زمانی ۵ سال که زلزله M_0 (و یا بالاتر) در آن رخ می‌دهد. نتایج کاربرد روش M8 در کمربند باختری اقیانوس آرام در بین سال‌های ۱۹۸۵ الی ۱۹۹۷ نشان داد که تمامی ۷ زلزله بزرگ آن پیش‌بینی شدند. فرایند انجام کار به این صورت بود که منطقه با یک رشته دوایر با قطر ۱۳۳۳ کیلومتر (۱۷۰ دایره) پوشش داده شد (شکل ۲) (Kossobokov et al., 1999). نتیجه کاربرد این الگوریتم برای زلزله‌های بزرگ عبارت است از توانایی پیش‌بینی ۷۰ تا ۹۰ درصد از زلزله‌های بزرگ که تنها حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد از محدوده مورد مطالعه در زون هشدار قرار گرفته است (Keilis-Borok et al., 2001).

۳- نتایج کاربرد الگوریتم در پیش‌بینی

نتایج پژوهش‌های انجام شده برای زلزله‌های با بزرگ‌ای بالای ۸ طی سال‌های ۱۹۸۵

قطر $D(M_0)$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این ترتیب که برای بررسی هر نقطه ابتدا بر پایه بزرگ‌ای مورد نظر یک شعاع بررسی تعیین می‌شود و پس از آن شروط مربوط به امکان تجزیه الگوریتم M8 بررسی می‌شود. رابطه تجربی زیر برای تعیین محدوده بررسی بزرگ‌ای مورد نظر ارائه شده است (Keilis-Borok & Kossobokov, 1987).

$$R(mo) = 55.5 (e^{(mo-5.6)} + 1) \quad (1)$$

اجرای الگوریتم M8 نیاز به نمونه‌برداری منظم از کل منطقه مورد بررسی و استفاده از اشکال هندسی، مثلاً دایره دارد. در درون هر دایره، یک توالی از زمین‌لرزه‌ها که در آن پس‌لرزه‌ها از زمین‌لرزه‌های اصلی حذف شده‌اند، مورد توجه قرار می‌گیرد. پس‌لرزه‌ها باعث تضعیف اثر زمین‌لرزه‌های اصلی با بزرگ‌ای‌های کوچک می‌شوند، به همین دلیل، باید از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها حذف شوند (Kossobokov, 1997).

در روش‌های شناسایی الگو، داده‌ها به یک سری از توابع تبدیل می‌شوند که بخش مهم این تبدیل‌ها عبارتند از میانگین‌گیری در حوزه زمان و مکان. میانگین‌گیری مکانی با استفاده از تمام داده‌های لرزه‌ای مناطق مورد مطالعه دوایر بررسی (Circle of Investigation) CI و میانگین‌گیری زمانی با جمع کردن مقادیر در یک دوره زمانی گذشته صورت می‌پذیرد. برای آنالیز الگوریتم باید به دو نکته توجه شود یکی فاصله زمانی زلزله‌ها و دیگری بزرگ‌ای آنها. فاصله انتخاب شده برای آنالیز الگوریتم با توجه به کیفیت و کامل بودن کاتالوگ لرزه‌ای تعیین می‌شود. در سال ۱۹۶۰ کیفیت و درجه کامل بودن کاتالوگ لرزه‌ای جهانی با نصب شبکه جهانی لرزه‌ای بهبود یافت. از ۱۹۶۳ زلزله‌های با بزرگ‌ای ۵ و بالاتر تعیین محل شدند. همچنین کاتالوگ لرزه‌خیزی برای زلزله ۴ تا حدودی کامل شد. (Kossobokov, 1998) شروع آنالیز الگوریتم M8 را ۱ ژانویه ۱۹۶۳ انتخاب کرد اگرچه این زمان در کاتالوگ‌های محلی امکان دارد که زودتر یا دیرتر باشد.

یکی از تأثیرگذارترین داده‌های آماری در یک کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها پس‌لرزه‌ها هستند. پس‌لرزه‌ها، خوشه‌ای از زلزله‌های کوچک هستند که در پی یک زلزله بزرگ رخ می‌دهند. وجود پس‌لرزه‌ها در یک کاتالوگ لرزه‌ای باعث کم رنگ شدن اثر زلزله‌های اصلی کوچک در یک آنالیز آماری می‌شوند. بنابراین برای بهتر شدن یک آنالیز آماری باید پس‌لرزه‌ها را از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها حذف کرد. در الگوریتم M8 پس‌لرزه‌ها عبارتند از هر زلزله کوچکی که در پی یک زلزله بزرگ و در زمان و فاصله معین اتفاق افتاده باشد. برای حذف پس‌لرزه‌ها مدل‌های مختلفی ارائه شده است. برای مثال می‌توان به مدل (Keilis-Borok & Soloviev, 2002) و یا (Gardner & Knopoff, 1974) اشاره کرد.

بنابراین تمام زلزله‌هایی که در زون پس‌لرزه‌ای واقع شوند باید از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها حذف شوند. حذف پس‌لرزه بدین معنی است که در طول گسل‌ها یا پهنه‌های لرزه‌ای، فرض می‌شود که زمین‌لرزه‌ها به طور تصادفی در مکان و زمان اتفاق می‌افتند. بنابراین زمان رخداد زمین‌لرزه آتی مستقل از زمان سپری شده از رخداد آخرین زمین‌لرزه است. همچنین فرایند زمین‌لرزه‌ها یک فرایند پواسونی است که دارای حافظه نیست. یعنی بزرگ‌ای زمین‌لرزه‌ها در یک پهنه لرزه‌خیز مستقل از یکدیگرند. لازم به یادآوری است که در الگوریتم M8 پس‌لرزه‌ها نیز برای تصمیم‌گیری اعلام پهنه خطر ضروری‌اند. بدین ترتیب کاتالوگ به دو بخش پس‌لرزه‌ای و رخداد‌های اصلی تقسیم می‌شود.

همانطور که پیش‌تر یاد شد برای شمارش زلزله‌ها باید یک بزرگ‌ای حدپایین برای مجموعه داده‌ها تعریف کرد. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که الگوریتم M8 یک حد پایین مطلق برای اجرای الگوریتم خود در نظر نمی‌گیرد. بر اساس درجه کامل بودن کاتالوگ و همچنین میزان لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه حد پایین بزرگ‌ا قابل تعریف می‌شود. بر پایه الگوریتم M8 در هر نقطه بررسی باید دایره‌ای متناسب با بزرگ‌ای مورد نظر رسم شود. طبق این الگوریتم ۵ کاتالوگ متفاوت برای محاسبه ۷ تابع الگوریتم مورد نیاز است که باید تهیه شود. کاتالوگ‌ها عبارت‌اند از: CAT20،

(McClusky et al., 2000). بر همین اساس نرخ لغزش به‌دست آمده از GPS برای گسل شمال آتاتولی برابر با 24 ± 1 میلی‌متر در سال است (McClusky et al., 2000). مطالعه و بررسی سازوکار زلزله‌ها در این منطقه نشان می‌دهد که زلزله‌های منطبق بر روند شمال خاوری - جنوب باختری (روند گسل خاور آتاتولی) دارای مؤلفه قوی امتدادلغز بوده و هرچه از این روند به سوی زمین‌درز زاگرس پیش می‌رویم مؤلفه فشاری زلزله‌ها بارزتر می‌شود. هر چند در منطقه وان زلزله‌های با سازوکار فشاری رخ داده‌اند که می‌توان آنها را به روندهای خاوری - باختری نسبت داد. زلزله ۲۳ نوامبر ۲۰۱۱ وان نیز بر پایه بازدید میدانی انجام شده و گزارش مقدماتی تیم بازدیدکننده ترک، به گسل فشاری وان با طول تقریبی ۴۰ کیلومتر مربوط می‌شود (Emre et al., 2011).

۵- پیش‌بینی زلزله‌های گذشته و آینده در محدوده مطالعاتی

پیش از به کار بردن الگوریتم M8 نیاز است تا کاتالوگ لرزه‌خیزی پهنه مورد مطالعه بررسی شود. بر این پایه کاتالوگ زلزله‌ها از منبع NEIC استخراج شد. این کاتالوگ تا ۲۰۱۱/۷/۳۰ توسط پروفیسور Kossobokov به‌روز شده و در اختیار این تیم مطالعاتی قرار گرفته است. کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها نشان‌دهنده فعالیت‌های لرزه‌ای زمین هستند. به همین دلیل مبنای بسیاری از مطالعات پیش‌نشانگری قرار می‌گیرند. پایدار بودن کامل‌شدگی کاتالوگ در سرتاسر مدت زمان بررسی یکی از نکات مهم و اساسی در پیش‌بینی زلزله است (Peresan et al., 2005). وجود خطا در یک کاتالوگ امری بدیهی است. بنابراین در گام نخست باید لغزش‌های یک کاتالوگ حذف شوند. یکی از مهم‌ترین این خطاها در یک کاتالوگ، موارد تکراری است که باید از کاتالوگ خارج شوند (Shebalin, 1992). کاتالوگ زلزله‌های پهنه آتاتولی خاوری و باختر ایران از ۳۶ تا ۴۸ طول جغرافیایی و ۳۵ تا ۴۳ عرض جغرافیایی انتخاب شدند. کاتالوگ انتخاب شده برای بزرگای ۴ کامل بوده و قابلیت این را دارد تا در الگوریتم M8 به کار گرفته شوند (شکل ۴). پس از انجام حذف پس‌لرزه‌ها توسط مدل (Keilis-Borok & Soloviev, 2002) در کاتالوگ یادشده، منطقه مورد مطالعه با یک شبکه ۱ درجه‌ای پوشش داده شد. شعاع بررسی با توجه به زلزله ۷/۳ ریشتری روی داده ۲۸۱ کیلومتر و برای بزرگای هدف ۷ ریشتر در نظر گرفته شد. منطقه به ۴۹ نقطه تست الگوریتم تقسیم شد و در هر منطقه الگوریتم M8 مورد آزمایش قرار گرفت. تنها تغییری که در داده‌های ورودی الگوریتم داده شد، تبدیل کاتالوگ‌های ۲۰ و ۱۰ به کاتالوگ‌های ۱۰ و ۵ بود که این عمل در مورد بیشتر زلزله‌های ایران، ترکیه و باختر پاکستان مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین می‌توان در برخی مناطق که لرزه‌خیزی کمتری دارند، این کاتالوگ‌های ورودی را تغییر داد. محاسبات افزون بر ردیابی زلزله‌های گذشته برای پیش‌بینی زلزله‌های آینده نیز در این محدوده مورد بررسی انجام شد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

تقریباً در تمامی زلزله‌های بزرگ منطقه مورد بررسی و در ۲ تا ۳ سال پیش از رخداد آنها، شاهد موارد زیر هستیم:

افزایش فعالیت لرزه‌ای در محدوده مورد بررسی، تغییرات زمانی قوی در فعالیت‌های لرزه‌ای، خوشه‌ای شدن پس‌لرزه‌ها در زمان و مکان، تداوم بازه فعالیت لرزه‌ای، افزایش خوشه‌ای شدن مکانی چشمه‌های لرزه‌ای.

ممکن است این نشانه‌ها افزایش پاسخ سنگ‌کره در اثر تنش‌های زمین‌ساختی تفسیر شوند. همچنین می‌تواند نشانه حالت بحرانی یک سامانه غیر خطی پیش از یک زلزله بزرگ و یا یک بالای طبیعی بزرگ باشد (Keilis-Borok, 1996).

پس از محاسبه الگوریتم M8 برای نقاط انتخابی، ۴ نقطه به شماره‌های ۱، ۲ و ۳ و ۹ در محدوده هشدار قرار گرفت و از زمان ۲۰۰۸/۱/۱ تا ۲۰۱۲/۱۲/۳۰ به مدت ۵ سال، زمان هشدار CTIP معرفی شد. نتایج نقطه شماره ۲ به عنوان نمونه در شکل ۵ ارائه شده است. زلزله در تاریخ ۲۰۱۱/۸/۲۳ و تقریباً در سال پایانی زمان CTIP رخ ۱۵

الی ۲۰۱۰ از ۱۹ زلزله، ۱۴ زلزله توسط الگوریتم M8 پیش‌بینی شده است. همچنین ۱۲ زلزله پیش‌بینی شده مربوط به بازه زمانی ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۰ بوده است. کاربرد الگوریتم M8 برای پیش‌بینی زلزله‌های بالای ۷/۵ نیز طی سال‌های ۱۹۸۵ الی ۲۰۱۰ از ۶۵ زلزله، ۳۸ مورد بوده است (Kossobokov, 2011).

برخی از نتایج پیش‌بینی‌های موفق توسط الگوریتم M8 به شرح زیر است (Keilis-Borok & Soloviev, 2002).

زمین‌لرزه ۱۹۸۶/۸/۳۰ با بزرگی ۷/۱ در رومانی، زمین‌لرزه ۱۹۹۲ لندرز با بزرگی ۷/۳ در کالیفرنیا، زمین‌لرزه ۱۹۹۳/۸/۸ با بزرگی ۸/۲ در گوام، زمین‌لرزه ۱۹۹۴/۱۰/۴ با بزرگی ۸/۳ شیکوتان ژاپن، زمین‌لرزه ۲۰۰۰/۶/۴ با بزرگی ۸/۳ در جنوب سوماترا، زمین‌لرزه ۱۹۸۵/۹/۱۹ با بزرگی ۸/۱ در مکزیک، زمین‌لرزه ۱۹۸۶/۱۰/۲۰ با بزرگی ۸/۳ کرماک، زمین‌لرزه ۱۹۹۸/۳/۲۵ با بزرگی ۸/۳ بالی.

در بیشتر موارد موفق پیش‌بینی، کامل بودن کاتالوگ و تعداد مناسب زمین‌لرزه‌ها در سال نقش مهمی داشته‌اند. از میان موارد ناموفق می‌توان به زمین‌لرزه ۱۹۹۴ بولیوی و ۲۰۱۱ توهوکو ژاپن اشاره کرد. گفتنی است که پیش‌بینی به ظاهر ناموفق زلزله ۲۰۱۱ ژاپن در پنجره مکانی صحیح ولی تنها ۷۰ روز خارج از پنجره زمانی اتفاق افتاده است. دلیل نبود موفقیت در زلزله توهوکو پوشش نامناسب سرتاسری ژاپن با دوایر مورد بررسی ادعا شده است. بدین معنی که اگر دوایر در سرتاسر ژاپن و با یک شبکه فشرده‌تر بررسی می‌شد، این زلزله قابل ردیابی می‌بود. در شکل‌های پیوست مقاله، نمونه‌هایی از پیش‌بینی‌های صورت گرفته ارائه شده است (شکل‌های ۸ الی ۱۱).

۴- لرزه‌خیزی و زمین‌ساخت شمال باختر فلات ایران

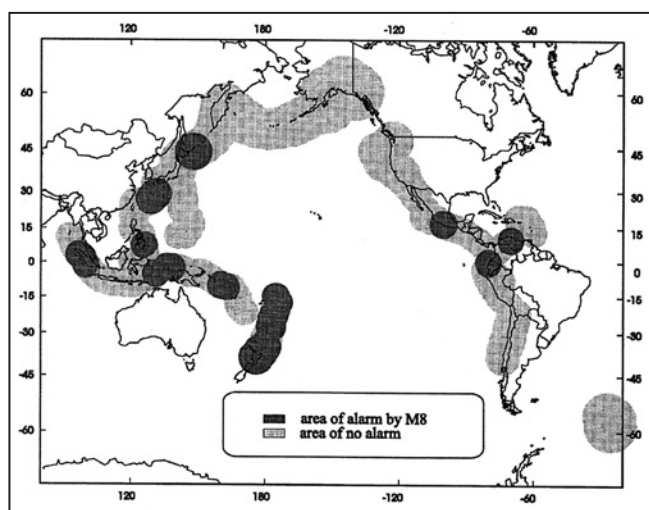
فلات ایران- ترکیه یکی از دو فلات مهم سامانه برخورد آلپ - هیمالیا است. این فلات از خاور آتاتولی تا خاور ایران گسترده شده است (Sengor et al., 1979; Dewey et al., 1986). ارتفاع متوسط این فلات ۱/۵ تا ۲ کیلومتر است که در خاور ایران به ۵۰۰ متر کاهش می‌یابد. سنگ بستر فلات شامل خرده‌قاره‌هایی است که در کرتاسه و تشریری پیشین به یکدیگر و ورقه اوراسیا متصل شده‌اند (Sengor, 1990). مرز بین صفحه‌ها را افولیت‌ها و ملازها پر کرده‌اند. خرده‌قاره‌ها شامل زون سنندج - سیرجان، به موازات و در شمال خاور زمین‌درز زاگرس، بلوک لوت در خاور ایران هستند (Berberian et al., 1982) (شکل ۳).

بخش اعظم ترکیه بر روی صفحه آتاتولی قرار گرفته است، صفحه زمین‌ساختی کوچک گوه‌ای شکلی که در اثر اعمال نیرو از سمت جنوب توسط صفحه عربستان و از سمت خاور توسط صفحه اوراسیا به سمت باختر در حال حرکت است. صفحه عربی با سرعت ۲۰ میلی‌متر در سال در حال فشرده کردن ایران و صفحه آتاتولی است (Allen et al., 2004). صفحه آتاتولی از دید لرزه‌خیزی منطقه‌ای فعال است که زلزله‌های تاریخی و دستگاهی متعددی را تجربه کرده است. زمین‌ساخت حاکم در منطقه، حاصل عملکرد گسلش امتدادلغز در گسل آتاتولی خاوری و در شمال نتیجه فعالیت پهنه گسلی شمال آتاتولی است. در ناحیه دریاچه وان و مناطق خاوری‌تر آن، زمین‌ساخت توسط زمین‌درز بیتلیس و کمربند چین و راندگی زاگرس کنترل می‌شود. زمین‌درز راندگی بیتلیس و پهنه گسلی آتاتولی خاوری با پهنه گسلی شمال آتاتولی تشکیل یک پهنه برخوردی گوه‌ای، گسترده و نامنظم را می‌دهند. این منطقه برخوردی با اختلاف ارتفاع توپوگرافی برابر با ۱۵۰۰ در فلات آتاتولی مشخص می‌شود. حرکت به سمت باختر صفحه آتاتولی باعث ایجاد لغزش بر روی گسل‌های خاور و شمال آتاتولی می‌شود (McKenzie, 1972). همچنین گسل چپ‌گرد خاور آتاتولی باعث ایجاد جنبش بین صفحه عربی و صفحه آتاتولی شده است.

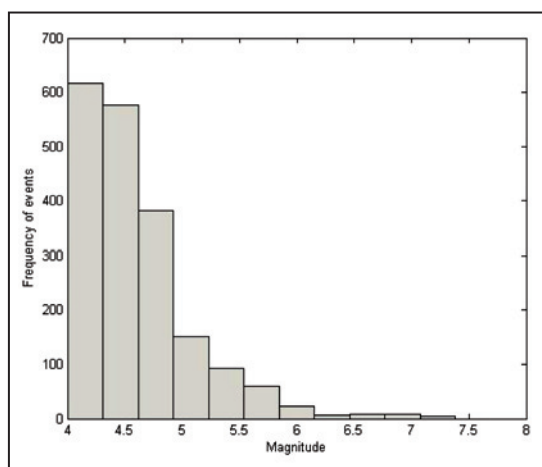
نرخ لغزش‌های قدیمی مبنی بر گشتاور لرزه‌ای زمین‌لرزه‌ها در طول گسل خاور آتاتولی، جابه‌جایی ۶-۱۰ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد (Taymaz et al., 1991). همچنین نرخ لغزش به‌دست آمده از GPS برابر با 9 ± 1 میلی‌متر در سال است

مکانی میل به خوشه شدن بیشتری دارند (Keilis-Borok, 1996). همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، ۲ پهنه خوشه شده در فصل مشترک مناطق هشدار وجود دارد. هر کدام می‌تواند به عنوان مکان زلزله بعدی معرفی شوند. شاید دلیل این مسئله این باشد که مراکز خوشه‌ها به علت تعدد زلزله‌ها و آزاد شدن انرژی دیگر توان تولید یک زلزله بزرگ را ندارند. در نهایت این طور نتیجه گرفته می‌شود که الگوریتم M8 یکی از معتبرترین و دقیق‌ترین روش‌های پیش‌بینی است که توانست، زلزله مهم وان ترکیه را پیش‌بینی کند. به این ترتیب باید با به کارگیری این الگوریتم برای فلات ایران، ترکیه و پاکستان برای بزرگ‌های مختلف، مناطق دارای پتانسیل زلزله هدف معرفی شوند.

نکته با اهمیت در این مطالعه کاربرد الگوریتم M8 برای پایش زلزله‌های آینده با توجه به موفقیت پیش‌بینی زلزله اخیر وان است. نتایج محاسبات نشان داد که هیچ محدوده افزایش احتمال رخدادی از زمان اتمام کاتالوگ (۲۰۱۱/۷/۳۰) برای بزرگای ۷ به مدت ۵ سال به دست نیامد.

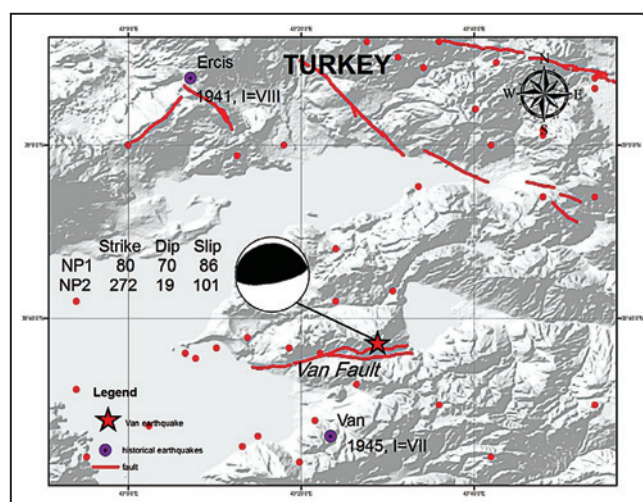


شکل ۲- مجموعه دوایر مورد بررسی در کمربند لرزه خیز اقیانوس آرام با اندکی تغییرات (Kossobokov et al., 1999).

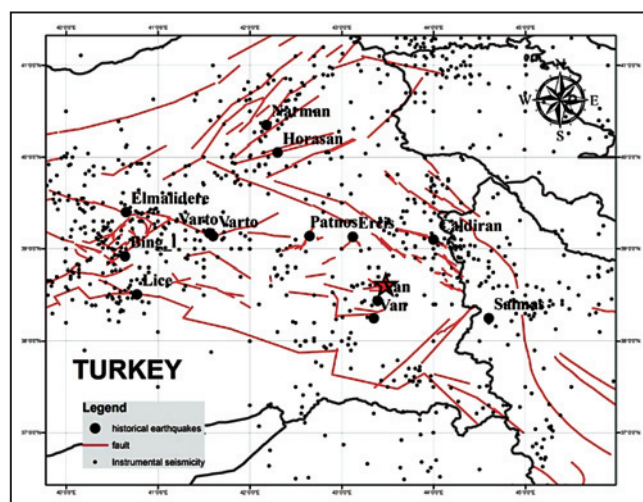


شکل ۴- همان‌گونه که مشخص است کاتالوگ محدوده برای زلزله‌های ۴ به بالا کامل بوده و می‌توان برای اجرای الگوریتم از آن بهره برد.

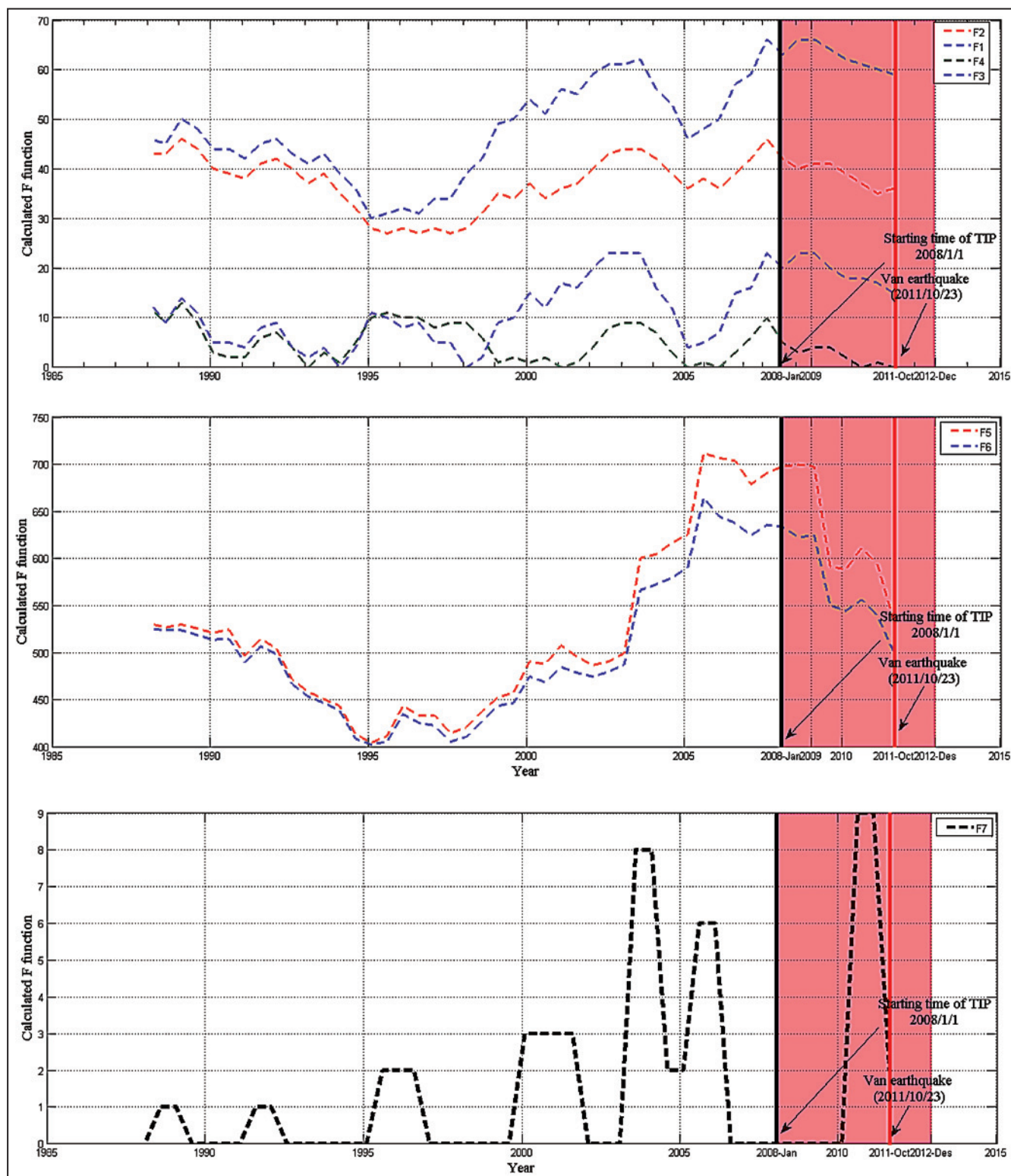
داده است. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، نقطه شماره ۳ منطبق بر رو مرکز زلزله ۲۰۱۱/۸/۲۳ وان بوده است. نکته با اهمیت در این بررسی این است که در تمامی ۴۵ نقطه‌ای که در آنها حد آستانه هشدار به وجود نیامد، هشدار اشتباه FTIP نیز گزارش نشده است. بنابراین، از نقاط قوت این پیش‌بینی بازنگرانه، نبود هشدار اشتباه در نقاط مجاور رویداد و حتی در طول دوره بررسی از سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۱/۷/۳۰ در مناطقی که CTIP داشتیم، می‌باشد. اجرای الگوریتم M8 در بررسی حاضر سه سؤال مهم هر پیش‌بینی زمین‌لرزه (کدام محدوده؟ چه بزرگی؟ و چه زمانی؟) را پاسخ گفت. در این مطالعه بزرگای ۷ به عنوان بزرگای هدف انتخاب شد. شعاع رخداد نیز به صورت ۲۸۱ کیلومتر از هر نقطه مورد بررسی تعیین شد که نهایتاً در ۴ منطقه محدوده هشدار مشخص شد. مهم‌ترین بخش در الگوریتم، اعلام زمان رویداد است که عبارت است از ۵ سال از زمان شروع CTIP در تاریخ ۲۰۰۸/۱/۱. روش پیشنهادی برای کاهش پنجره مکانی، استفاده از بسامد رویداد زلزله‌ها و تشکیل خوشه‌های لرزه است. هر چه احتمال رویداد یک زلزله بزرگ بیشتر باشد زلزله‌ها در آن محل از نظر



شکل ۱- رومرکز زلزله ۲۰۱۱/۱۰/۲۳ با بزرگای گشتاوری ۷/۳ و گسل فشاری وان که مسبب زمین لرزه بوده است.

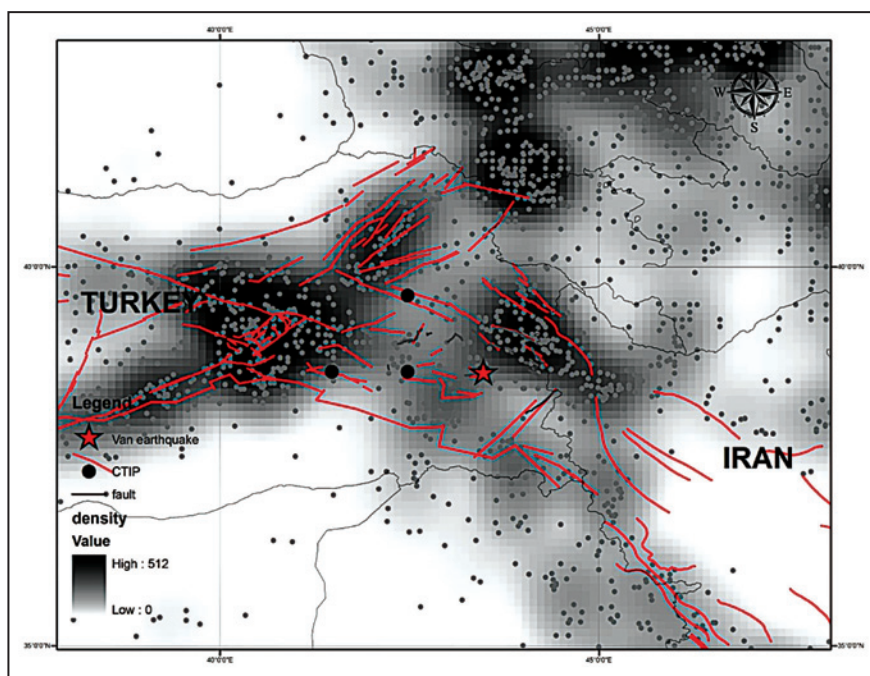
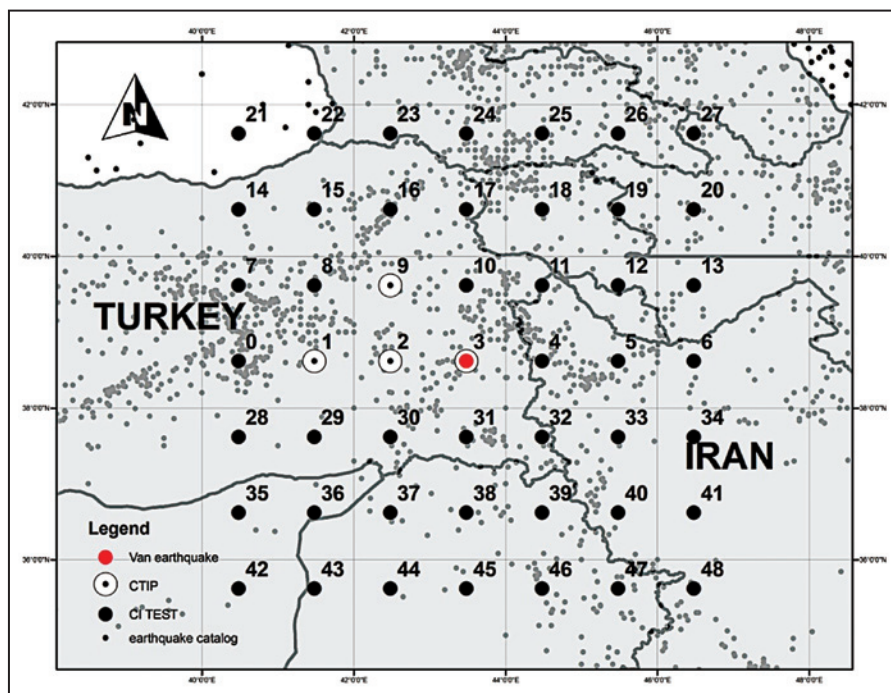


شکل ۳- لرزه‌خیزی منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که زلزله‌ها در محل رخداد زلزله وان حالتی خوشه‌ای پیدا کرده‌اند. نکته مهم در این نقشه توزیع زمانی زلزله‌ها است که حدود ۲ ماه پیش از زلزله وان به نقشه درآمده‌اند. روند لرزه‌خیزی به صورت عمده از سه روند گسلی زاگرس، آتاتولی شمالی و آتاتولی خاوری تبعیت می‌کند. این نقشه با تلفیق داده‌های لرزه‌ای سازمان زمین‌شناسی آمریکا (۱۹۶۳ الی ۲۰۱۱) و گسل‌های پروژه تحلیل خطر زمین‌لرزه در خاورمیانه (۲۰۱۱) تهیه شده است.



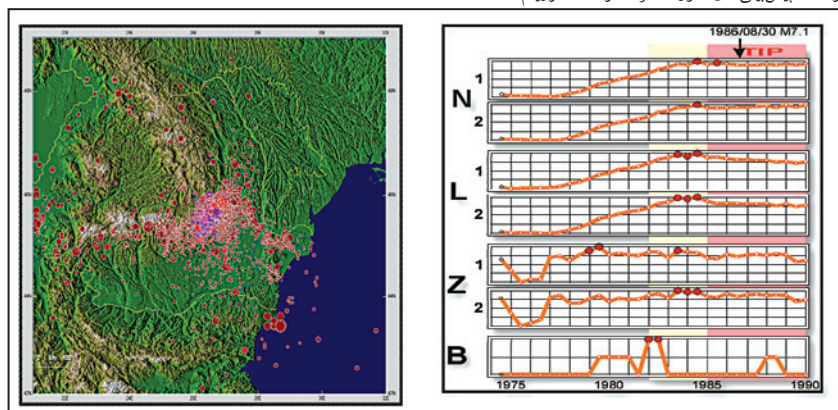
شکل ۵- تغییرات هفتگانه توابع الگوریتم M8 برای نقطه شماره دو نشان داده شده است. در سال ۲۰۰۸ نقطه اوج توابع نشان‌دهنده شروع یک پنجره زمانی هشدار است. پنجره زمانی هشدار با مستطیل سرخ رنگ نمایش داده شده است.

شکل ۶- نمایش یک شبکه ۱۰۰ در ۱۰۰ کیلومتری که الگوریتم M8 به مرکزیت نقاط شبکه اجرا شده است. دایر سفید رنگ (CTIP) نقاطی هستند که زلزله وان به مرکزیت آنها پیش‌بینی شد. برای نقاط ۱، ۲، ۳ و ۹ زمان شروع CTIP سال ۲۰۰۸ بوده است.

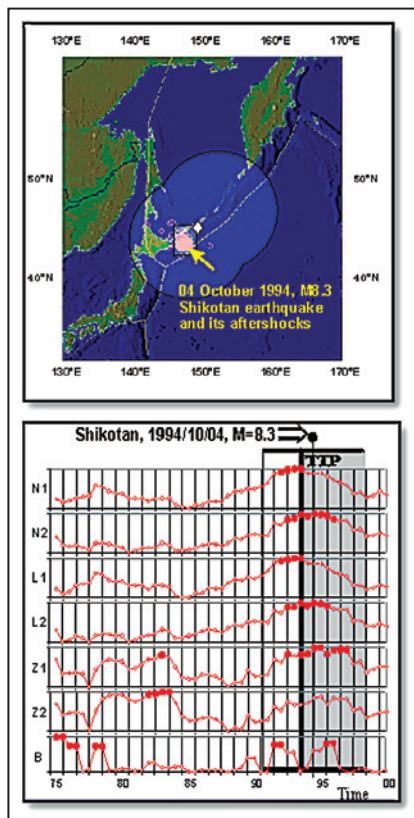


شکل ۷- خوشه‌های مکانی زلزله‌ها در محدوده مورد مطالعه. هرچه میزان لرزه‌خیزی بالا می‌رود رنگ خوشه‌ها تیره‌تر می‌شود. همچنین هر چه از حاشیه‌ها به درون خوشه‌ها پیش می‌رویم آهنگ رویداد بیشتر می‌شود.

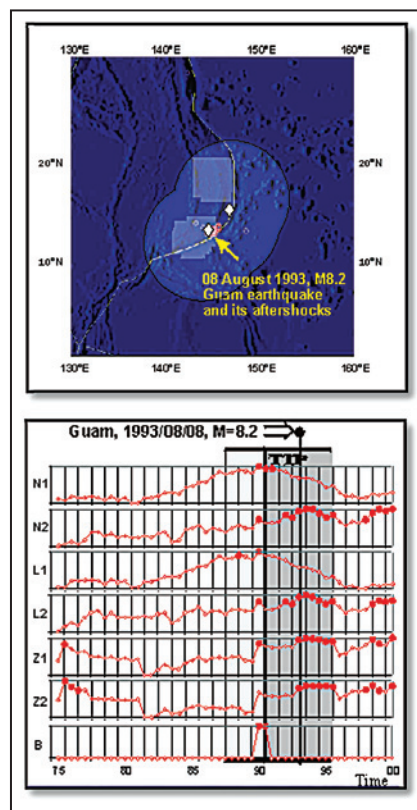
پیوست: پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط الگوریتم M8



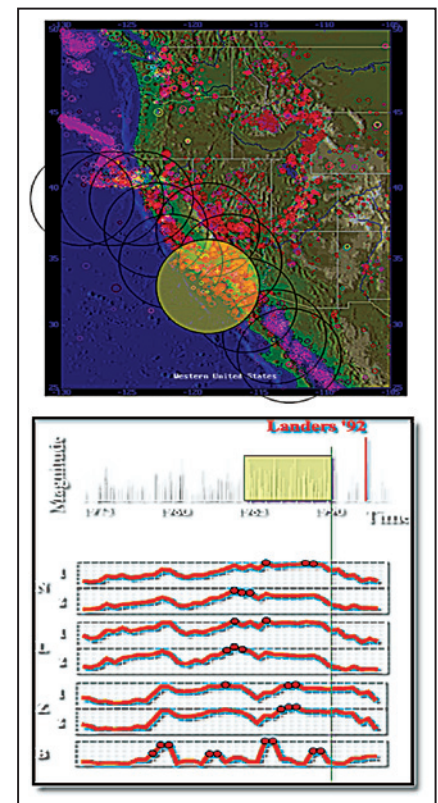
شکل ۸- تعیین زمان افزایش احتمال رخداد در زمان ۱۹۸۵ برای زلزله بالای ۷ در Vrancea رومانی (Keilis-Borok & Soloviev, 2002)



شکل ۱۱- نمایش افزایش توابع هفتگانه در زلزله ۱۹۹۴ شیکوتان (Keilis-Borok & Soloviev, 2002).



شکل ۱۰- نمایش افزایش توابع هفتگانه در زلزله ۱۹۹۳ گوام (Keilis-Borok & Soloviev, 2002).



شکل ۹- پیش‌بینی زمین‌لرزه لندرز (Landers) در کالیفرنیا با بزرگای $M_w = 7/3$. همان گونه که دیده می‌شود شروع زمان TIP برابر است با سال ۱۹۹۰. به هر ترتیب زلزله در سال ۱۹۹۲ به وقوع پیوسته است (Keilis-Borok & Soloviev, 2002).

جدول ۱- زمین‌لرزه‌های تاریخی پهنه خاوری آنا تولی (Ambraseys, 1988)

No	Year	Month	Day	Lat	Lon	Ms	Io	Earthquake Name
1	1983	Oct	30	40.35	42.18	6.7	VIII	Narman
2	1976	Nov	24	39.1	44	7.1	IX	Caldiran
3	1975	Sep	6	38.51	40.77	6.6	IX	Lice
4	1972	Jun	16	38.25	43.35	4.9	VIII	Van
5	1971	May	22	38.92	40.64	6.8	IX	Bingöl
6	1966	Aug	19	39.17	41.56	6.8	IX	Varto
7	1959	Oct	25	39.14	41.6	4.9	VIII	Varto
8	1949	Aug	17	39.4	40.65	6.9	IX	Elmalidere
9	1945	Nov	20	38.44	43.39	4.8	VII	Van
10	1941	Sep	10	39.13	43.12	5.9	VIII	Ercis
11	1941	Nov	12	39.85	39.35	5.9	VIII	Erzincan
12	1939	Des	26	39.8	39.38	7.8	XI	Erzincan
13	1930	May	6	38.25	44.6	7.2	X	Salmas
14	1924	Sep	13	40.05	42.3	6.8	IX	Horasan
15	1903	Apr	28	39.14	42.65	7	X	Patnos

مکانی (به اندازه طول چشمه)	زمانی (سالانه)
تا ۱۰۰	بزرگ
۵-۱۰	متوسط
۲-۳	باریک
۱	دقیق

جدول ۲- طبقه‌بندی زمانی و مکانی پیش‌بینی (Kossobokov et al, 2002).

References

- Allen, C. R., Edwards, W., Hall, W. J., Knopoff, L., Raleigh, C. B., Savit, C. H., Toksoz, M. N. & Turner, R. H. 1976- Predicting earthquakes: a scientific and technical evaluation- with implications for society. Panel on Earthquake Prediction of the Committee on Seismology, Assembly of Mathematical and Physical Sciences. National Research Council, U.S. National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Allen, M., Jackson, J. & Walker, R., 2004- Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, Vol. 23, TC2008.
- Ambraseys, N. N., 1988- Engineering Seismology. earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 17, 1-105.
- Berberian, F., Muir, I. D., Pankhurst, R. J. & Berberian, M., 1982- Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran, *J. Geol. Soc. London*, 139, 605 – 614.
- CAT-i Service, 2000- Natural Hazards—Review of the Year 1999. Guy Carpenter and Company. (Available for download at www.guycarp.com).
- Dewey, J. F., Hempton, M. R., Kidd, W. S. F., Saroglu, F. & Sengor, A. M. C., 1986- Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of eastern Anatolia, a young collision zone, in *Collision Tectonics*, edited by M. P. Coward and A. C. Ries, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 19, 3 – 36.
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S. & Elmacı, H., 2011- A Preliminary Report on Turkey Earthquake of 23 October 2011.
- Gardner, J. K. & Knopoff, L., 1974- Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed Poisson, *Bull. Seism. Soc. Am.* 64, 1363-1367.
- Gulkan, P., Gurbinar, A. & Celebi, M., 1978- Engineering Report on the Muradiye-Caldiran, Turkey earthquake 24 Nov 1976.
- Keilis-Borok, V. I. & Soloviev, A. A., 2002- Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction, Springer-verlag, Berlin, 166-172.
- Keilis-Borok, V. I., 1996- Intermediate term earthquake prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 93, 3748– 3755.
- Keilis-Borok, V. I., Ismail-Zadeh, A. T., Kossobokov, V. & Shebalin, P., 2001- Non-linear Dynamics of the Lithosphere and Intermediate-term Earthquake Prediction. *Tectonophysics* 338, 247-260.
- Keilis-Borok, V. I. & Kossobokov, V. G., 1984- A complex of longterm precursors for the strongest earthquakes of the world. *Proc. 27th Geological Congress vol. 61. Nauka, Moscow*, pp. 56–66.
- Keilis-Borok, V. I. & Kossobokov, V. G., 1987- Periods of high probability of occurrence of the world's strongest earthquakes. *Computational Seismology vol. 19. Allerton Press*, pp. 45– 53.
- Kossobokov, V. G., 1986- The test of algorithm M8. In: Sadovsky, 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. (Eds.), *Algorithms for Earthquake Statistics and Prediction, IASPEI Software Library vol. 6. Seismol. Soc. Am., El Cerrito, CA*.
- Kossobokov, V. G., 2011- Are Mega Earthquakes Predictable?. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 46, No. 8, pp. 951–961.
- Kossobokov, V. G., Romashkova, L. L., Keilis-Borok, V. I. & Healy, J. H., 1999b- Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992–1997. *Phys. Earth Planet. Inter.* 111, 187– 196.
- Kossobokov, V. G., Romashkova, L. L., Panza, G. F. & Peresan, A., 2002- Stabilizing intermediate-term middle-range earthquake predictions. *J. Seismol. Earthq. Eng.* 8, 11– 19.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, V., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, N. & Veis, G., 2000- Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *J. Geophys. Res.*, 105, 5695 – 5719.
- McKenzie, D. P., 1972- Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30, 109 – 185.
- Peresan, A., Kossobokov, V., Romashkova, L., Panza, G.F., 2005- Intermediate-term middle-range earthquake predictions in Italy: a review. *Earth-Science Reviews* 69, 97-132.
- Sengor, A. M. C., 1990- A new model for the late Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman, in *The Geology and Tectonics of the Oman Region*, edited by A. H. F.
- Sengor, A. M. C. & Kidd, W. S. F., 1979- Post-collisional tectonics of the Turkish-Iranian plateau and a comparison with Tibet, *Tectonophysics*, 55, 361 – 376.
- Shebalin, P. N., 1992- Automatic duplicate identification in set of earthquake catalogues merged together. *Open-File Rep. U.S. Geol. Surv.*, 92– 401 (Appendix II).
- Taymaz, T., Jackson, J. A. & McKenzie, D., 1991- Active tectonics of the north and central Aegean Sea, *Geophys. J. Int.*, 106, 403 – 490.
- USGS, 2011-United States Geological Survey. (WWW.USGS.com)
- Zare, M., Haghshenas, E. & Bastami, M., 2011- The Van, Turkey Earthquake of 23 October 2011, A Preliminary Report on the Reconnaissance Visit Performed by IIEES Reconnaissance Team.

Investigation of M8 Algorithm Prediction Performance in West of Iranian Plateau(23/10/2011, Mw = 7.3)

M. Mojarab ^{1*}, H. Memarian ², M. Zare ³ & V. Kossobokov ⁴

¹ Ph.D., Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

⁴ Professor, International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical, Geophysics, Moscow, Russia

Received: 2012 January 23

Accepted: 2012 September 09

Abstract

The earthquake of 23 October 2011, near the Turkish city of Van, had 600 victims and caused great damages in Van, Argis, Moradiyeh and Caldiran. Review of 20th century and historical earthquakes in eastern Anatolian plate and west of Iranian plateau confirmed the activity of this area with the notable earthquake of 24 November 1976 in Caldiran. The main objective of this paper is evaluation of predictability of earthquakes in this region. Presently, the two main approaches for predicting extreme events are precursory and pattern recognition algorithms. For this study, we applied M8 algorithm that is based on pattern recognition. In this respect, a 49 point network were designed around the epicenter of Van earthquake and M8 algorithm applied to this network. The end result was four zones with some overlaps that were proposed as CTIP (current time of increase probability). This study could predict the Van earthquake with 1/1/2008 to 30/12/2012 time window, 281 km local radius and magnitude of more than 7. In addition, forward prediction in this area shows there is no alarm for magnitude 7+ in next 5 years. This study showed the strength of M8 algorithm for predicting earthquakes in the Middle East. It can be concluded that using algorithms based on pattern recognition can play an important role for mitigation of damages in seismic events.

Keywords: Earthquake Prediction, Eastern Anatolia - Iranian Plateau, Pattern Recognition, M8 Algorithm, Time Of Increase Probability.

For Persian Version see pages 13 to 20

*Corresponding author: M. Mojarab; E-mail: mmojarab@ut.ac.ir