

کاهش عدم قطعیت مکانی در الگوریتم M8 با استفاده از چشمه‌های

بالقوه زمین لرزه

نوید شادمنامن*، نوربخش میرزائی*، عبدالرضا قدس**، علی نگارستانی*** و فروغ کشوری*

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

** مرکز تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان صندوق پستی ۱۱۵۹-۴۵۱۱۹۵

*** سازمان انرژی اتمی ایران صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۱۳۷۲۱، پذیرش مقاله: ۱۴۱۲۹)

چکیده

کاربرد الگوریتم M8 یکی از راهکارهای معتبر در پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه است. گستره مکانی پیش‌بینی شده با این الگوریتم، ناحیه نسبتاً وسیعی را دربرمی‌گیرد. از این‌رو، با توجه به اینکه زمین‌لرزه‌ها در محیط‌هایی رخ می‌دهند که پتانسیل لازم برای تجمع تنش و ایجاد گسیختگی را داشته باشند، با مشخص کردن این مناطق که در واقع همان چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه‌اند و محدود کردن گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 به این چشمه‌ها، می‌توان وسعت این گستره را محدودتر کرد و عدم قطعیت مکانی را کاهش داد. در این تحقیق، ابتدا این روش برای زمین‌لرزه‌های رودبار و بم که الگوریتم M8 توانسته است در حد قابل قبولی آنها را پیش‌بینی کند، آزمایش شده است. در مرحله بعد، گستره‌های پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 برای رویداد زمین‌لرزه‌های آتی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه وسعت نواحی پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 در صورت استفاده از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه است.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت مکانی، الگوریتم M8، چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، پیش‌بینی میان‌مدت، پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای

۱ مقدمه

اساس آن پیش‌بینی شده است (کیلیس- بوروک و کوسوبوکف، ۱۹۹۰).

مشکلی که در کاربرد الگوریتم‌های پیش‌بینی میان‌مدت، به‌خصوص الگوریتم M8 وجود دارد، این است که عدم قطعیت مکانی در آنها نسبتاً زیاد است و ناحیه پیش‌بینی شده، وسعت زیادی دارد (قدس، ۱۳۸۱). الگوریتم‌ها و روش‌های مکمل دیگری برای رفع این مشکل طراحی و ابداع شده است که هر کدام از آنها نیز مشکلات خاص خودشان را دارند. هدف ما در این تحقیق، کاهش عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8 طی دو مرحله، شامل استفاده از فصل مشترک نواحی اعلام خطر (قدس، ۱۳۸۱) و چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه است. چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه مکان‌هایی هستند که پتانسیل لازم برای ایجاد زمین‌لرزه را دارند.

الگوریتم M8 برای پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه را کیلیس- بوروک و کوسوبوکف (۱۹۸۴) با تحلیل و بررسی زلزله‌خیزی قبل از زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۸/۰ یا بیشتر طراحی کردند و به‌همین دلیل نیز نام M8 را برای آن برگزیدند. این الگوریتم از پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای (فراوانی سالیانه زمین‌لرزه‌ها، انحراف فراوانی از روند بلندمدت، چگالی سطحی انرژی لرزه‌ای و تجمع (clustering) زمین‌لرزه‌ها) برای پیش‌بینی استفاده می‌کند. در واقع، طراحان M8 با بررسی روند وقوع زمین‌لرزه‌های بسیار بزرگ ($M \geq 8/0$) دریافتند که اکثر این زمین‌لرزه‌ها با مجموعه‌ای از فعالیت‌های پیش‌آگاهی‌دهنده قبل از وقوع زمین‌لرزه اصلی همراه‌اند. الگوریتم M8 از روش‌های معتبر در پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه محسوب می‌شود و تا کنون چندین زمین‌لرزه بزرگ ($M \geq 6/5$) بر

۲ الگوریتم M8

الگوریتم M8 از پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای برای پیش‌بینی استفاده می‌کند، بنابراین، ورودی آن، کاتالوگ زمین‌لرزه‌های منطقه مورد مطالعه است. کاتالوگ مورد استفاده بایستی از درجه کامل بودن بالایی برخوردار باشد و پس‌لرزه‌ها نیز به دلیل تضعیف اثر زمین‌لرزه‌های اصلی با بزرگی‌های کوچک از کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها حذف شده باشند (کوسوبوکف، ۱۹۹۷). کامل بودن کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها در محدوده بزرگی خاص به این معناست که نمودار فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها بر حسب بزرگی در آن محدوده خاص از رابطه گوتنبرگ-ریشتر تبعیت کند. برای مثال، اگر پیروی داده‌ها از رابطه گوتنبرگ-ریشتر برای زمین‌لرزه‌های بالاتر از ۴ باشد، می‌گوییم که داده‌ها برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۴ کامل است. الگوریتم M8 با مجموعه دایره‌های هم‌پوشانی، منطقه لرزه‌ای مورد مطالعه را بررسی می‌کند. شعاع این دایره‌های هم‌پوشانی به بزرگی زمین‌لرزه مورد انتظار الگوریتم برای پیش‌بینی، M_0 ، بستگی دارد. طبیعی است که هر چقدر M_0 بزرگ‌تر باشد شعاع دایره بررسی نیز بزرگ‌تر می‌شود. پس از چندین آزمایش، طراحان M8 رابطه زیر را بین شعاع دایره و بزرگی زمین‌لرزه موردنظر پیش‌بینی ارائه کردند (کوسوبوکف، ۱۹۹۷).

$$R(M_0) = 55.5(\exp(M_0 - 5.6) + 1) \quad (1)$$

که در آن، R شعاع دایره بررسی است. با استفاده از این رابطه، شعاع‌های ۶۶۸، ۴۲۷، ۲۸۱ و ۱۹۲ کیلومتر به ترتیب برای بزرگی‌های ۸/۰، ۷/۵، ۷/۰ و ۶/۵ به دست می‌آید. در داخل هر دایره، الگوریتم M8 توابعی را روی بازه‌های زمانی ۶ ساله و بازه بزرگی (M_{cutoff}, M_0) محاسبه می‌کند که در آن M_{cutoff} بزرگی حد پایین انتخاب شده با الگوریتم M8 برای توالی زمین‌لرزه‌های موجود در هر دایره است. الگوریتم M8 با استفاده از این توابع، پیش‌بینی را عملی می‌سازد. توابع در هر نیم‌سال از

زمان شروع تا انتهای آنالیز محاسبه می‌شوند. در صورتی که تعداد خاصی از این توابع مقادیر بسیار بزرگی در دو نیم‌سال متوالی داشته باشند، اعلام خطری برای ۵ سال آینده برای وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی M_0 و بیشتر در دایره مورد نظر اعلام می‌شود. سایر دایره‌های هم‌پوشانی نیز بدین ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، دایره‌های هم‌پوشانی که شرایط لازم برای اعلام خطر را داشته باشند، گستره پیش‌بینی الگوریتم M8 را تشکیل می‌دهند.

گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 ناحیه نسبتاً وسیعی را دربرمی‌گیرد، برای مثال، به‌منظور پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های به بزرگی ۷/۵ یا بیشتر، مساحت هر دایره هم‌پوشانی ۵۱۳، ۵۷۲ کیلومتر مربع است. در صورتی که تعداد بیشتری از این دایره‌های هم‌پوشانی اعلام خطر را نشان دهند، ناحیه پیش‌بینی شده توسط الگوریتم M8 نیز وسیع‌تر می‌شود و در نتیجه عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8 افزایش می‌یابد.

برای رفع این مشکل، طراحان الگوریتم M8 الگوریتم دیگری به نام MSc را ابداع کردند و توانستند عدم قطعیت مکانی و زمانی الگوریتم M8 را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند (کوسوبوکف و شبالین، ۲۰۰۳). اما، مشکلی که وجود دارد این است که الگوریتم MSc نیازمند کاتالوگ کامل‌تری نسبت به کاتالوگ مورد نیاز در الگوریتم M8 است؛ به‌طوری‌که، برای M_0 مساوی ۷/۵ و ۷ بایستی کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها به ترتیب برای بزرگی‌های ۳/۵ و ۳ کامل باشد. در چند سال اخیر، شبکه لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران قادر به ثبت زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۳ و بزرگ‌تر در اکثر نقاط ایران شده است، ولی، با توجه به کوتاه بودن مدت زمان این کاتالوگ، در حال حاضر کاربرد الگوریتم MSc در ایران نمی‌تواند چندان موفقیت‌آمیز باشد.

در این تحقیق سعی شده است، طی دو مرحله، عدم

زمین‌لرزه که در داخل این نواحی قرار دارند، محدود کرد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که احتمال رخداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه به مراتب بیشتر است. بنابراین، اگر ناحیه اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 منحصراً به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در آن ناحیه محدود شود، عدم قطعیت مکانی الگوریتم کاهش می‌یابد و ناحیه پیش‌بینی شده کوچک‌تر می‌شود. از سوی دیگر، چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در ناحیه پیش‌بینی شده را می‌توان بر حسب شانس وقوع زمین‌لرزه در آنها به‌طور نسبی اولویت‌بندی کرد. با این کار، برای خود این چشمه‌ها نیز می‌توان احتمالی را در نظر گرفت. اولویت‌بندی می‌تواند بر اساس توان چشمه‌ها برای ایجاد زمین‌لرزه با توجه به سابقه زلزله‌خیزی این چشمه‌ها، میزان جنبش تکتونیکی آنها در رژیم ژئودینامیکی حاضر و همچنین موقعیت آنها در گستره اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 صورت پذیرد.

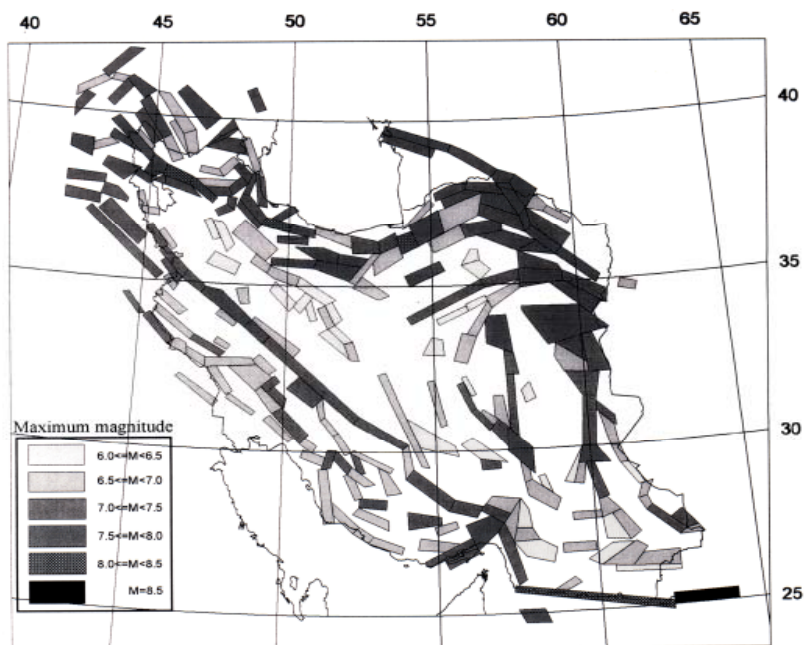
الگوریتم M8 برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های رودبار ($M_w = 7/3$ ، ۱۹۹۰/۰۶/۲۰) و بم (۲۰۰۳/۱۲/۲۶، $M_w = 6/8$) مورد آزمایش قرار گرفته است (قدس، ۱۳۸۱؛ شادمان، ۱۳۸۳). برای اجرای الگوریتم M8، شبکه‌هایی با ابعاد 15×15 درجه متشکل از 18×18 نقطه به فواصل مساوی از همدیگر انتخاب می‌شوند. مرکز این شبکه‌ها در مجاورت رومرکز زمین‌لرزه‌های رودبار و بم قرار دارند و آرایه 18×18 نقطه‌ای مراکز دایره‌های هم‌پوشانی را تشکیل می‌دهند. مقدار M_0 در این آزمایشات $7/5$ لحاظ شده است (قدس، ۱۳۸۱؛ شادمان، ۱۳۸۳). آزمایش‌ها بیانگر تعیین دایره‌های اعلام خطر زیادی برای هر دو زمین‌لرزه توسط الگوریتم M8 است (شکل‌های ۲ و ۳). شکل‌های ۲ و ۳ دایره‌های اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 برای زمین‌لرزه‌های رودبار و بم به‌همراه انطباق آنها روی نقشه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که رومرکز

قطعیت مکانی الگوریتم M8 کاسته شود. در مرحله اول، به‌جای استفاده از دایره‌های هم‌پوشانی با مراکز ثابت و از پیش تعیین شده (کوسوبوکف و شبالین، ۲۰۰۳)، شبکه مترامی از مراکز دایره‌های هم‌پوشانی برای مطالعه منطقه لرزه‌ای به کار می‌رود. در این حالت، ناحیه بیشترین هم‌پوشانی دایره‌های اعلام خطر به‌مثابه گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 در نظر گرفته می‌شود (قدس، ۱۳۸۱). مرحله دوم بر این اساس استوار است که در داخل همان ناحیه پیش‌بینی شده نیز احتمال وقوع زمین‌لرزه در مناطقی خاص بیشتر از سایر مناطق است. این مناطق خاص در واقع همان چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه‌اند. در این مرحله، با مشخص کردن چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه موجود در منطقه لرزه‌ای، گستره پیش‌بینی حاصل از مرحله اول به این چشمه‌ها محدود می‌شود. در مجموع، با این روش‌ها عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8 به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به همین منظور، در ابتدا این روش برای گستره‌های زمین‌لرزه‌های رودبار (۱۹۹۰، $M_s = 7/7$) و بم (۲۰۰۳، $M_w = 6/8$) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، با نشان دادن کارایی این روش در پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های یادشده، در گستره‌های اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 برای زمین‌لرزه‌های آتی (پیش‌بینی پیش‌رو) نیز این روش را به کار می‌بریم.

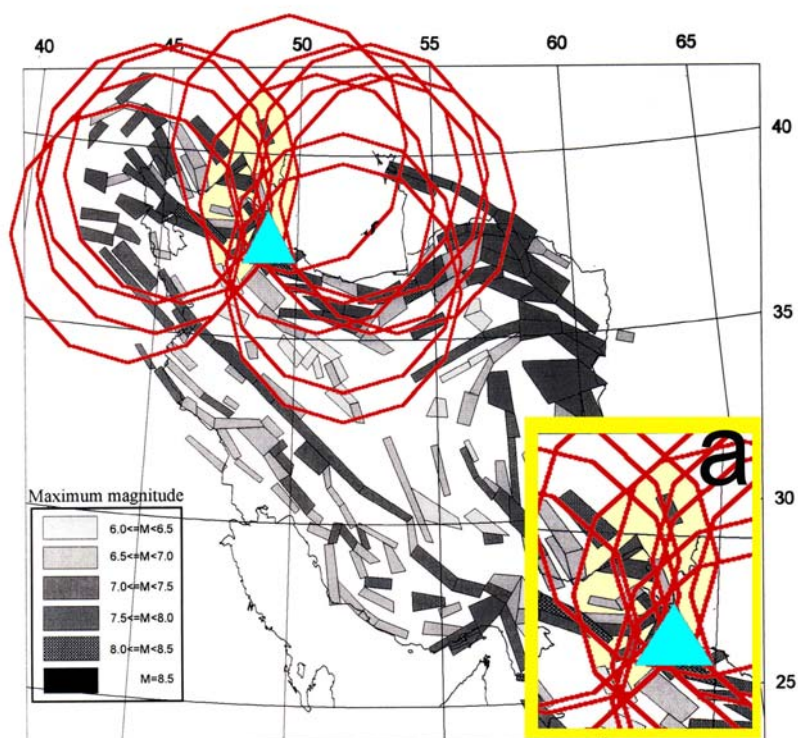
۳ کاربرد چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه برای کاهش

عدم قطعیت مکانی در الگوریتم M8

نقشه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹) در شکل ۱ نشان داده شده است. توان چشمه‌ها برای ایجاد زمین‌لرزه بر اساس سابقه زلزله‌خیزی، میزان جنبش تکتونیکی در رژیم ژئودینامیکی حاضر و ابعاد گسل‌های موجود در این چشمه‌ها تعیین شده است. با داشتن نقشه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، ناحیه پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 را می‌توان به چشمه‌های بالقوه



شکل ۱. چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۲. گستره اعلام خطر الگوریتم M8 برای زمین‌لرزه رودبار و انطباق آنها با چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در شمال ایران. تصویر داخل کادر a، ناحیه هم‌پوشانی دایره‌های اعلام خطر را نشان می‌دهد.

که چشمه مسبب این زمین‌لرزه یکی از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه موجود در ناحیه پیش‌بینی شده است که در فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر تعیین شده قرار دارد. چشمه بالقوه زمین‌لرزه بم که در شکل ۵ با شماره ۱۳۰ مشخص شده است، ابعاد نسبتاً کوچکی دارد. برای این چشمه که شهر بم نیز در داخل آن قرار دارد، توانایی ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی ۶/۰ تا ۶/۵ برآورد شده بود.

۴ کاهش عدم قطعیت الگوریتم M8 برای گستره‌های

پیش‌بینی پیشرو در ایران

چنانچه ملاحظه شد، با استفاده از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه می‌توان عدم قطعیت مکانی در الگوریتم M8 را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در این بخش، ما قصد داریم این روش را برای نواحی که الگوریتم M8 آنها را به‌مثابه گستره‌های احتمالی رخداد زمین‌لرزه‌های آتی (پیش‌بینی پیشرو) در ایران شناسایی کرده است، به‌کار ببریم. آزمایش الگوریتم M8 برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آتی در ایران نشان دهنده دو گستره اعلام خطر برای وقوع زمین‌لرزه در غرب و جنوب‌غرب ایران است (شادمنا من، ۱۳۸۳).

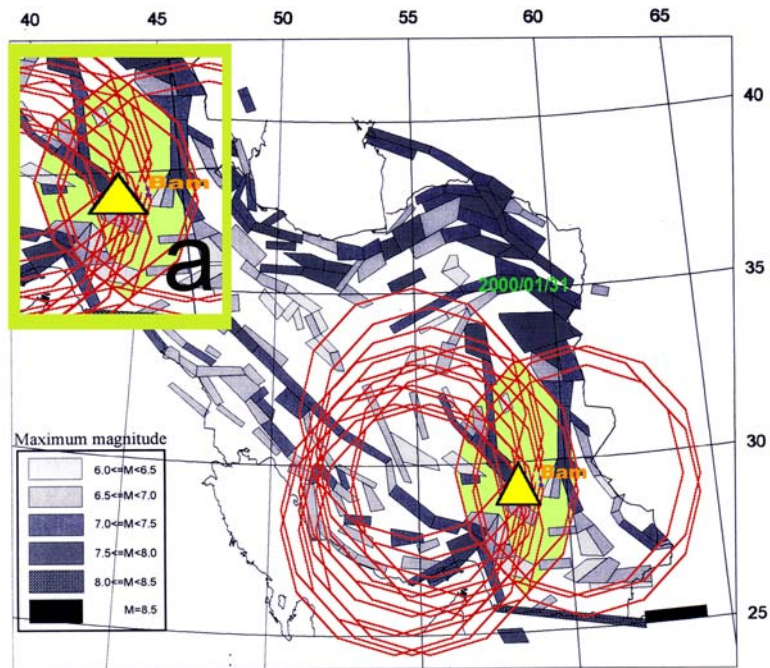
برای اعلام خطرهای غرب کشور که به‌مدت ۵ سال از اواسط ۲۰۰۳ شروع می‌شوند، به‌دلیل لرزه‌خیزی زیاد زاگرس، برای شبکه در نظر گرفته شده که غرب کشور را پوشش می‌داد، مقدار M_0 ، ۷/۰ انتخاب شده است. این اعلام خطرها که آن‌را گستره اعلام خطر کرمانشاه نامگذاری کرده‌ایم، چشمه‌های بالقوه زیادی را دربرمی‌گیرد (شکل ۶). ناحیه پیش‌بینی شده، منطقه فعالی است که گسل‌های فعال زاگرس از جمله قطعات «گسل اصلی عهد حاضر» (چالانکو و پرو، ۱۹۷۴؛ بربریان، ۱۹۹۵) را دربر می‌گیرد. دایره‌های اعلام خطر کرمانشاه هم‌پوشانی بسیار زیادی دارند. نقشه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه این منطقه با جزئیات بیشتر در شکل ۷ ارائه شده است.

زمین‌لرزه‌های رودبار و بم در محل بیشترین هم‌پوشانی دایره‌های اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 قرار دارند (مرحله اول کاهش عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8).

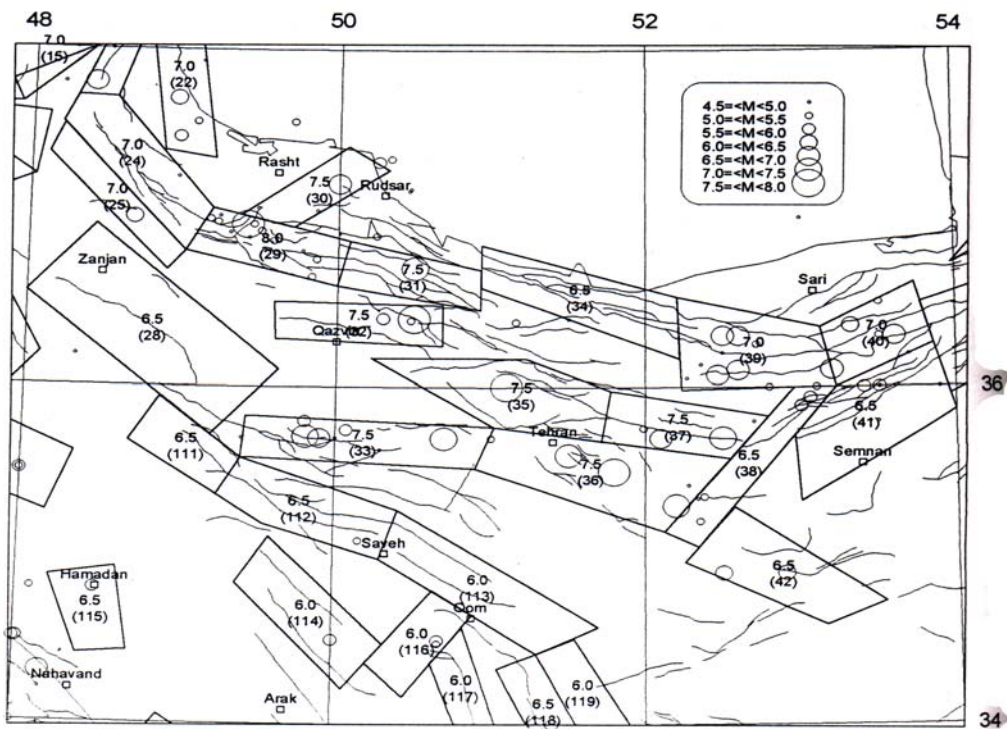
با این حال، هدف این است که در داخل این ناحیه کوچک شده نیز با استفاده از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه موجود در محدوده هم‌پوشانی، مساحت گستره پیش‌بینی را هرچه بیشتر کاهش دهیم (مرحله دوم کاهش عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8). همچنین، از شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که رومرکز زمین‌لرزه‌های رودبار و بم در داخل چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه موجود در گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 قرار می‌گیرند.

اگر دایره‌های اعلام خطر تعیین شده برای زمین‌لرزه رودبار که اعلام خطر آنها اکثراً از اواسط ۱۹۸۷ و اوایل ۱۹۸۸ شروع می‌شود را در نظر بگیریم (شکل ۲)، ملاحظه می‌شود که چشمه مسبب این زمین‌لرزه در محل بیشترین فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر قرار دارد. این چشمه از جمله چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه است که وقوع زمین‌لرزه در آن از احتمال بیشتری برخوردار بوده است. برای چشمه بالقوه زمین‌لرزه رودبار که در شکل ۴ با شماره ۲۹ مشخص شده است، بیشینه بزرگی معادل ۸ برآورد شده است.

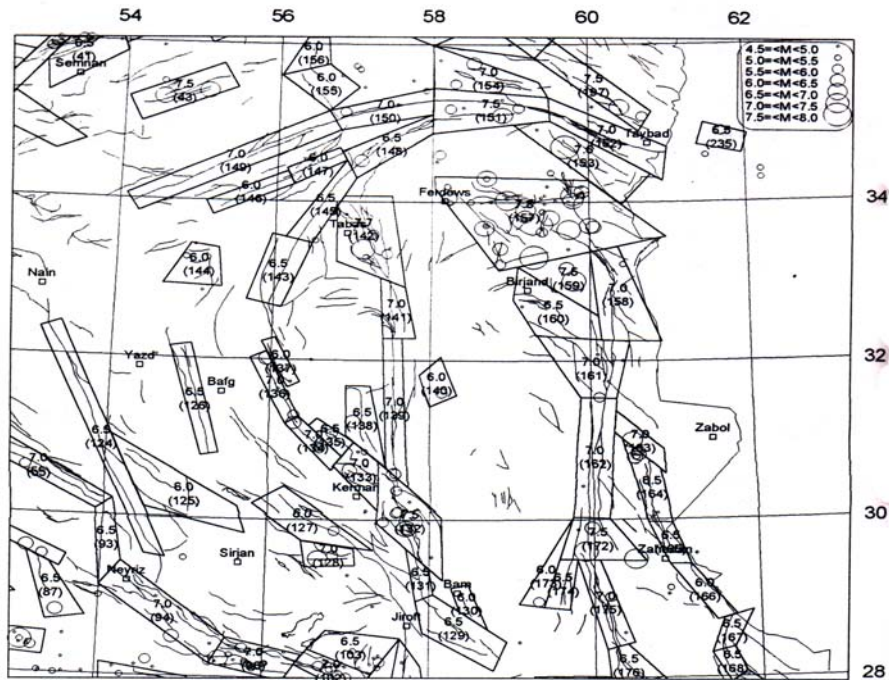
شکل ۳ گستره اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 به‌همراه نقشه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در گستره‌ای که زمین‌لرزه بم روی داد را نشان می‌دهد. در مورد اعلام خطرهای زمین‌لرزه بم که اکثراً از اوایل ۲۰۰۰ شروع می‌شوند، باید متذکر شویم که بزرگی زمین‌لرزه رخ داده ($M_w = 6/8$) از مقدار M_0 در نظر گرفته شده ($M_0 = 7/5$) کوچک‌تر است و با توجه به اتمام مدت زمان اعلام خطرها (اوایل ۲۰۰۵) می‌توان گفت که پیش‌بینی صورت گرفته در حدود ۰/۷ خطای بزرگی دارد. با وجود این، برای زمین‌لرزه بم نیز مشاهده می‌شود



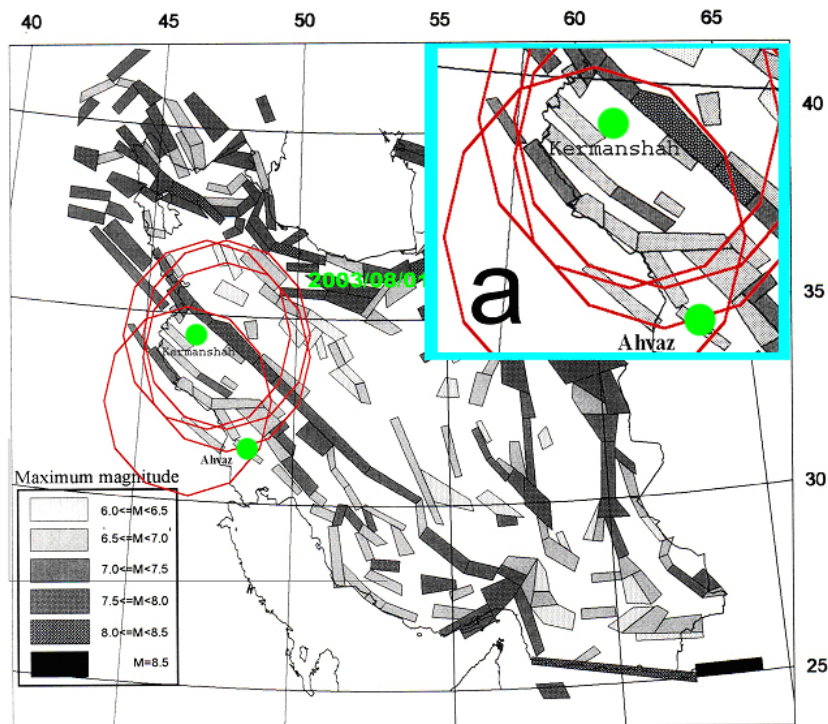
شکل ۳. گستره اعلام خطر الگوریتم M8 برای زمین لرزه بم و انطباق آن با چشمه‌های بالقوه زمین لرزه در جنوب شرق ایران. تصویر داخل کادر a، ناحیه هم‌پوشانی دایره‌های اعلام خطر را نشان می‌دهد.



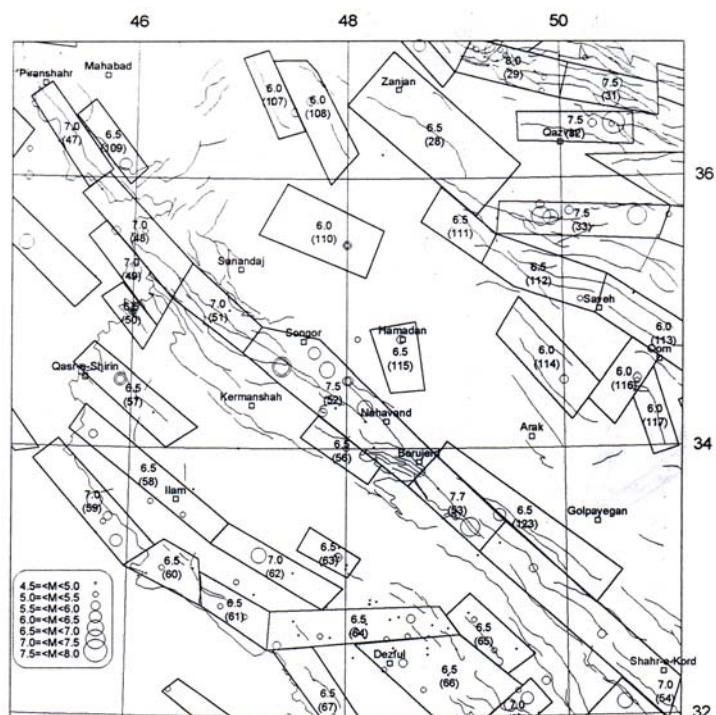
شکل ۴. چشمه‌های بالقوه زمین لرزه در شمال ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹).



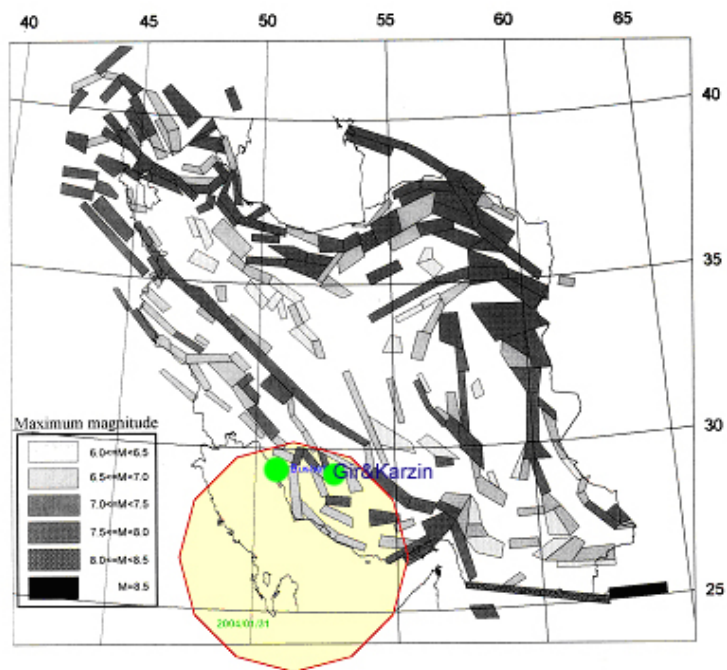
شکل ۵. چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در شرق ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۶. گستره اعلام خطر الگوریتم M8 برای غرب کشور و انطباق آنها با چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه. تصویر داخل کادر a، ناحیه هم‌پوشانی دایره‌های اعلام خطر را نشان می‌دهد.



شکل ۷. چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در غرب ایران (میرزائی و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۸. گستره اعلام خطر الگوریتم M8 برای جنوب غرب کشور و انطباق آنها با چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه.

جدول ۱ تعدادی از مهم‌ترین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه داخل فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر کرمانشاه را به همراه توان زلزله‌خیزی آنها که به صورت نسبی الویت‌بندی شده است را نشان می‌دهد. وقوع زمین‌لرزه در این چشمه‌ها نسبت به سایر چشمه‌ها از احتمال بیشتری برخوردار است. سابقه زلزله‌خیزی و محل چشمه‌ها با توجه به جایگاه تکتونیکی آنها و نیز قرارگیری در فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر از دلایل مهم انتخاب این چشمه‌ها است. در جدول ۲ آمار زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵/۰ که در چشمه‌های یادشده روی داده‌اند، ارائه شده است. چشمه‌های شماره ۵۱، ۴۸، ۴۹، ۱۱۵، ۵۶، ۶۳، ۱۲۳،

۵۰، ۶۷، ۴۷، ۱۰۹، ۶۶، ۵۷، ۵۴، ۶۵ و ۶۹ در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

شکل ۸ گستره اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 برای جنوب غرب کشور که اعلام خطر قیر و کارزین نامیده شده است را به همراه چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه نشان می‌دهد. برای شبکه در نظر گرفته شده در جنوب غرب کشور که در آن مقدار M_0 ، ۷/۵ انتخاب شده است، الگوریتم M8 تنها یک دایره اعلام خطر را نشان می‌دهد. این اعلام خطر از اواخر ۲۰۰۴ شروع می‌شود و تا اواخر ۲۰۰۹ ادامه دارد.

جدول ۱. اولویت‌بندی چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه برای اعلام خطر تعیین شده برای غرب ایران. ترتیب اولویت‌بندی از راست به چپ است.

شماره چشمه	۵۲	۵۳	۶۲	۵۸	۵۹	۵۷	۶۴	۶۱	۶۰
پتانسیل چشمه	۷/۵	۷/۷	۷/۰	۶/۵	۷/۰	۶/۵	۶/۵	۶/۵	۶/۵

جدول ۲. پیشینه زلزله‌خیزی برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵ و بالاتر در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه که در جدول ۱ الویت‌بندی شده‌اند.

چشمه ۵۲		چشمه ۵۳		چشمه ۶۲		چشمه ۵۸		چشمه ۵۹		چشمه ۵۷		چشمه ۶۴		چشمه ۶۱		چشمه ۶۰	
بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ	بزرگی	تاریخ
۷/۰	۱۰۰۸	۷/۴	۱۹۰۹	۶/۸	۱۸۷۲	۵/۴	۱۹۴۰	۶/۸	۱۱۳۰	۶/۴	۹۵۸	۶	۱۹۲۷	۵/۳	۱۹۷۲	۵	۱۹۷۲
۶/۵	۱۱۰۷	۵/۵	۱۹۵۵			۵/۸	۱۹۶۷	۶/۴	۱۸۶۴	۵/۹	۱۱۵۰	۵/۸	۱۹۷۷	۵/۴	۱۹۸۸		
۵/۹	۱۴۳۰							۶/۳	۱۹۱۷			۵/۷	۱۹۸۰				
۶/۱	۱۸۷۲							۵/۷	۱۹۳۸			۵/۶	۱۹۸۳				
۶/۷	۱۹۵۷											۵/۵	۱۹۸۹				
۵/۸	۱۹۶۳																
۵/۰	۱۹۸۷																
۵/۴	۲۰۰۲																
۵/۲	۲۰۰۲																

۵ نتیجه‌گیری

گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 چندین برابر چشمه زمین‌لرزه در شرف وقوع است. با در نظر گرفتن محل بیشترین فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر تعیین شده با الگوریتم M8 به مثابه گستره پیش‌بینی برای وقوع زمین‌لرزه، می‌توان وسعت ناحیه پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 را کاهش داد. محدود کردن گستره پیش‌بینی شده توسط الگوریتم M8 به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه

گستره پیش‌بینی شده با الگوریتم M8 چندین برابر چشمه زمین‌لرزه در شرف وقوع است. با در نظر گرفتن محل بیشترین فصل مشترک دایره‌های اعلام خطر تعیین شده با

- 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., 1990, Premonitory activation of earthquake flow: Algorithm M8. Phys. Earth Planet. Int., **61**, 73-83.
- 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., Soloviev, A. A., editors, Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer, 141-208.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1999, Delineation of potential seismic sources for seismic zoning of Iran. J. Seismol., **3**, 17-30.
- Tchalenko, J. S., and Braud, J., 1974, Seismicity and structure of the Zagros (Iran): the Main Recent Fault between 33° and 35° N. Phil. Trans. R. Soc. Lond., **A227**, 1-25.

موجود در آن گستره، نقش مؤثری در کاهش قابل ملاحظه عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8 دارد. کاربرد روش‌های بالا برای گستره‌های اعلام خطر کرمانشاه و قیروکارزین نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه عدم قطعیت مکانی الگوریتم M8 است. با کاهش ناحیه پیش‌بینی شده توسط الگوریتم M8 می‌توان منطقه بررسی پیش‌نشانگرهای کوتاه‌مدت را به این ناحیه محدود کرد.

منابع

- شادمان، ن.، ۱۳۸۳، الگوی لرزه‌خیزی کلان زمین‌لرزه‌ها و پیش‌بینی میان‌مدت زمین‌لرزه در ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- 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.

Berberian, M., 1995, Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, **241**, 193-224.