

ارزیابی نتایج الگوریتم M8 از راه تلفیق مکانی هشدارها (مطالعه موردی: زلزله سرپل ذهاب)

علی رضانی (a_ramezany@ut.ac.ir)

دانشجوی کارشناسی ارشد GIS، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی
دانشگاه تهران

رحیم علی عباسپور*

استادیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی دانشگاه تهران،

مسعود مجرب (mmojarab@ut.ac.ir)

گروه دانش بنیان مشاور بنیان زمین

(دریافت ۱۳۹۶/۹/۱۹ - پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۱۴)

چکیده

به طور متوسط هر چند سال یکبار، یک زلزله بزرگ و مخرب در فلات ایران اتفاق می افتد که به طور معمول، خسارات زیادی به جای می گذارد. زلزله های وان ترکیه، سراوان و سرپل ذهاب- کرمانشاه، سه زلزله اخیر این منطقه از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ بوده اند. توجه به رفتار پیش نشانگری لرزه ای با استفاده از الگوریتم های پیش بینی می تواند در کاهش خسارات چنین زلزله هایی مؤثر واقع شود. در این مقاله، الگوریتم میان مدت پیش بینی M8 برای بررسی بازنگرانه زلزله سرپل ذهاب به کار گرفته شده است. در اینجا هدف ارزیابی و تکمیل کارنامه الگوریتم M8 در پیش بینی زلزله های بزرگ فلات ایران و دستیابی به الگوی لرزه خیزی قبل از زلزله سرپل ذهاب است. علاوه بر این، ارائه راهکاری برای دستیابی به محدوده های هشدار غیر وابسته به مقادیر ورودی الگوریتم، دیگر هدف مهم این پژوهش است. در اینجا برای دستیابی به این هدف هشدارهای حاصل از مقادیر متفاوت ورودی های الگوریتم M8 به دو روش تلفیق شدند که هر دو روش در پیش بینی زلزله هدف موفق عمل کردند. نتایج نشان داد که زلزله سرپل ذهاب با استفاده از الگوریتم M8 به صورت بازنگرانه پیش بینی پذیر بوده است. همچنین از خروجی ها مشخص است که رویکرد تلفیق هشدارهای حاصل از اجراهای مختلف M8 مساحت هشدار را کاهش می دهد و محدوده هشدار را در برابر تغییر مقادیر پارامترهای ورودی ثابت می کند. در نهایت با بررسی مقادیر توابع الگوریتم M8 مشخص شد که به حداکثر رسیدن تعداد پس لرزه ها پیش نشانگر اصلی این زلزله بزرگ بوده است.

واژه های کلیدی: الگوریتم M8، پیش بینی زلزله، پیش نشانگر لرزه ای، پس لرزه، زلزله سرپل ذهاب.

مقدمه

تاریخ لرزه‌های فلات ایران نشان می‌دهد که در این منطقه به‌طور متوسط هر چند سال یک‌بار یک زلزله بزرگ و مخرب روی داده است. تجربه چنین زلزله‌هایی بسته به شدت و شرایط زمانی و مکانی رومرکز زلزله در فلات ایران، بیانگر آسیب‌پذیری زیاد این منطقه از این زلزله‌هاست. زلزله سیلاخور در سال ۱۹۰۹ با بزرگای ۷/۴ و ۸۰۰۰ کشته، زلزله بوئین‌زهر در سال ۱۹۶۲ با بزرگای ۷ و ۱۲۲۰۰ کشته، زلزله رودبار در سال ۱۹۹۰ با بزرگای ۷/۳ و ۴۰۰۰۰ کشته و زلزله بم در سال ۲۰۰۳ با بزرگای ۶/۶ و ۳۲۰۰۰ تا ۴۳۲۰۰ کشته نشان می‌دهد که امکان وقوع زلزله بزرگ در فلات ایران وجود دارد و این منطقه در برابر چنین زلزله‌هایی به‌شدت آسیب‌پذیر است [۳].

اقدامات لازم در مقاطع زمانی قبل از وقوع زلزله و بعد از آن، می‌تواند در کاهش خسارات جانی و مالی چنین زلزله‌هایی در سطوح کلان توسعه‌ای مؤثر باشد. توجه به پیش‌نشانگرها در قالب الگوریتم‌های پیش‌بینی یکی از روش‌های آمادگی در برابر زلزله است. تغییر رفتار لرزه‌ای قبل از زلزله‌های بزرگ و در محدوده مکانی آنها می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر یا یک پدیدهٔ اخطاردهنده استفاده شود. الگوریتم‌هایی مثل M8، اطلاعات الگو و CN از دستهٔ الگوریتم‌های میان‌مدت با محدودهٔ مکانی متوسط هستند که با استفاده از کاتالوگ زلزله و با اعمال قوانین در حوزهٔ مکان و زمان به‌صورت نظام‌مند، رفتار لرزه‌ای را در طی زمان پایش می‌کنند و تغییرات در وضعیت لرزه‌خیزی را اخطار می‌دهند [۱۹، ۱۰، ۹، ۸، ۶].

در این تحقیق زلزله ۷/۳ سرپل ذهاب در تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ به‌صورت بازنگرانه با استفاده از الگوریتم M8 بررسی شد. ارزیابی کارایی الگوریتم M8 در پیش‌بینی زلزله‌های بزرگ فلات ایران و همچنین دستیابی به الگوی مکانی و رفتاری هشداردهنده قبل از زلزله بزرگ سرپل ذهاب اهداف این مطالعه‌اند. ارائهٔ راهکاری به‌منظور دستیابی به مناطق هشدار غیروابسته به مقادیر پارامترهای ورودی الگوریتم M8، دیگر هدف مهم این تحقیق است. در قسمت بعد ابتدا ساختار الگوریتم M8 و سابقهٔ کاربرد آن بررسی و سپس اجرا شده و نتایج آن ارائه می‌شود؛ در نهایت به بحث و بررسی و نتیجه‌گیری از یافته‌ها پرداخته می‌شود.

الگوریتم M8

الگوریتم M8 یک الگوریتم شناسایی الگو بر مبنای کاتالوگ لرزه‌ای است که با هدف پیش‌بینی زلزله‌های بزرگ‌تر از ۸ ارائه شده است. این الگوریتم اولین بار برای ۱۳۲ نقطه در جهان به‌صورت بازنگرانه به‌منظور پیش‌بینی زلزله‌های شدیدتر از ۸ از سال ۱۹۵۷ تا سال ۱۹۸۳ به‌کار گرفته شد [۵]. این الگوریتم به‌صورت محلی و منطقه‌ای نیز در نقاط مختلف جهان مثل ژاپن، یونان و

ایتالیا اجرا شده است [۷، ۱۲، ۱۸، ۱۷].. شادمنان و همکاران الگوریتم M8 را برای منطقه ایران به کار گرفتند و همچنین با استفاده از چشمه‌های بالقوه زلزله مناطق هشدار را کاهش دادند [۱، ۲]. این الگوریتم توسط مجرب و همکاران در فلات ایران با هدف پیش‌بینی بازنگرانۀ زلزله‌های بیش از ۷ فلات ایران ارزیابی شد [۱۴]. از این الگوریتم برای پیش‌بینی بازنگرانۀ زلزله‌های وان ترکیه و سراوان نیز استفاده شد که نتایج موفق‌تری داشت [۱۵، ۱۳، ۳]. در تحقیقی دیگر مجرب و همکاران به اصلاح و تطبیق الگوریتم M8 با شرایط لرزه‌خیزی فلات ایران پرداختند [۱۶].

روش M8 با بررسی کاتالوگ لرزه‌های درون دایره بررسی وضعیت دایره بررسی را از لحاظ وقوع زلزله بزرگ در پنج سال آینده معرفی می‌کند. شعاع دایره بررسی متناسب با بزرگای هدف است و مطابق

$$R(M_i) = 55/5 \times (\exp(M_i - 5/6) + 1) / 2 \text{ km} \quad (1)$$

به دست می‌آید [۱۱].

برای اجرای الگوریتم در یک دایره بررسی یک سری زمانی با فاصله نیم سال از زمان t_0 (زمان شروع کاتالوگ) تا زمان t_{end} (زمان بررسی) تشکیل می‌شود. از زمان t_0 (زمان شروع اندازه‌گیری) و در هر t_i (زمان t_i)، هفت مقدار با استفاده از چهار تابع جدول ۱ محاسبه می‌شوند. این هفت مقدار با جایگذاری دو مقدار $N_1 = 20$ و $N_2 = 10$ در جدول ۲ به دست می‌آیند که در آن $M_{\text{min}}(N)$ بزرگایی است که به‌ازای آن میانگین تعداد زلزله‌های سالانه در دایره بررسی برابر N باشد.

مقادیری از توابع که از Q درصد مقادیر خود در طی زمان بزرگ‌ترند، به‌عنوان مقادیر خیلی بزرگ برچسب‌دار می‌شوند. مقدار Q برای توابع N ، L و Z برابر ۹۰ و برای تابع B برابر ۷۵ است. اگر در پنجره زمانی $(t_i - u, t_i)$ دست کم شش مقدار خیلی بزرگ شامل B وجود داشته باشد و این موضوع در دو زمان متوالی t_i و t_{i+1} تکرار شود، الگوریتم M8 دایره بررسی را به مدت پنج سال در وضعیت هشدار معرفی می‌کند [۱۱، ۵].

جدول ۱. توابع الگوریتم M8 و نحوه محاسبه آنها [۱۱]

توضیح	تابع
تعداد زلزله‌های اصلی در محدوده بزرگ $[M, \bar{M}]$ در زمان $(t_i - s, t_i)$	$N(t_i)$
تغییرات مقدار $N(t_i M, \bar{M}, s)$ نسبت به روند بلند آن	$L(t_i)$
تمرکز خطی زلزله‌های اصلی در محدوده بزرگ (M, \bar{M}) در زمان $(t_i - s, t_i)$	$Z(t_i)$
بیشترین تعداد پس‌لرزه برای زلزله‌های اصلی در محدوده بزرگ (M, \bar{M}) در زمان $(t_i - \hat{s}, t_i)$	$B(t_i)$

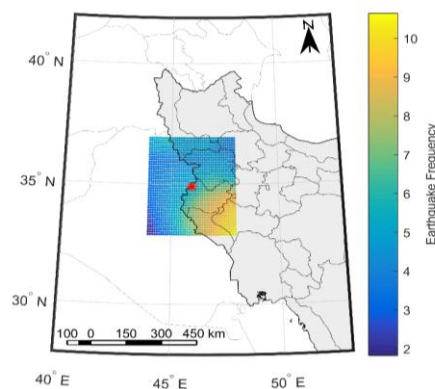
جدول ۲. توابع الگوریتم M8 و حدود آستانه بزرگای محاسبات آنها [۱۱]

\bar{M}	M	تابع
M_{\cdot}	$M_{min}(\tilde{N})$	N
M_{\cdot}	$M_{min}(\tilde{N})$	L
$M_{\cdot} - g$	$M_{min}(\tilde{N})$	Z
$M_{\cdot} - q$	$M_{\cdot} - p$	B

اجرا

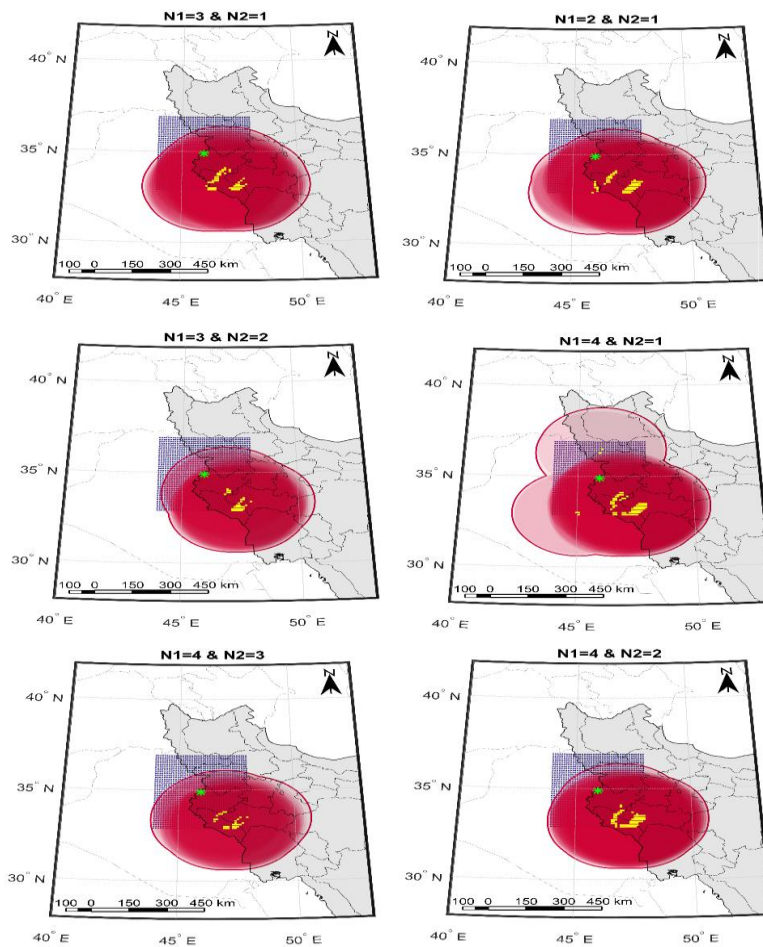
زلزله سرپل ذهاب در تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۲ در استان کرمانشاه و در طول ژئودتیکی ۴۵.۹۵۶۳ و عرض ژئودتیکی ۳۴.۹۰۵۲ با بزرگای ۷.۳ به وقوع پیوست. این زلزله به عنوان زلزله هدف در الگوریتم M8 انتخاب شد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، زلزله در قسمت بالای زاگرس و در نزدیکی مرز سیاسی ایران اتفاق افتاد. مشخصات زلزله هدف و همچنین زلزله های محاسبات از کاتالوگ زلزله NEIC انتخاب شد. زمان شروع کاتالوگ لرزه ای برای ورود به محاسبات، سال ۱۹۶۵ و زمان پایان محاسبات، ۲۰۱۷/۰۱/۰۱ در نظر گرفته شد.

برای بررسی بازنگرانه زلزله سرپل ذهاب، یک شبکه مکانی از نقاط بررسی با فاصله ۰/۱ درجه به شکل مربع و به مرکزیت رومرکز این زلزله ایجاد شد. بنابراین الگوریتم در یک شبکه مربعی به طول ضلع ۴ درجه و تعداد ۱۶۸۱ نقطه اجرا شد. این نقاط مراکز دایره های بررسی در الگوریتم M8 هستند. همان طور که در الگوریتم M8 توضیح داده شد، شعاع دایره بررسی اجرای این الگوریتم مطابق رابطه ۱ برای بزرگای ۷ محاسبه و برابر ۲۸۱ کیلومتر به دست آمد. شکل ۱ وضعیت نقاط بررسی را از لحاظ نرخ لرزه خیزی سالانه دایره بررسی آنها نشان می دهد.



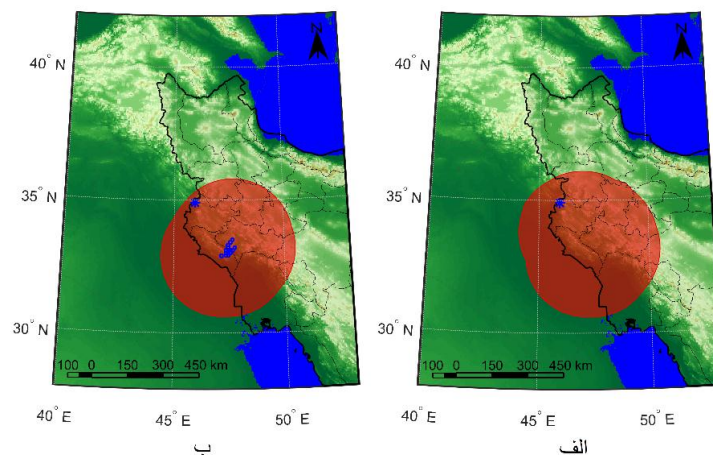
شکل ۱. نقشه موقعیت و وضعیت شبکه نقاط بررسی الگوریتم M8 (شدت رنگ هر نقطه، نشان دهنده نرخ لرزه خیزی سالانه آن و علامت ستاره در مرکز شبکه رومرکز زلزله سرپل ذهاب است).

الگوریتم M8 در شبکه نقاط بررسی و با مقادیر مختلف پارامترهای N_1 و N_2 که در نسخه اصلی الگوریتم به ترتیب برابر ۲۰ و ۱۰ هستند اجرا شد. با تغییر مقادیر N_1 و N_2 از ۱ تا ۴، الگوریتم در شش حالت $(1,2)$ ، $(1,3)$ ، $(1,4)$ ، $(2,3)$ ، $(2,4)$ ، $(3,4)$ اجرا شد. نقشه‌های هشدار حاصل از اجرای الگوریتم در تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۱ در این شش حالت اجرا در شکل ۲ مشخص شده است.

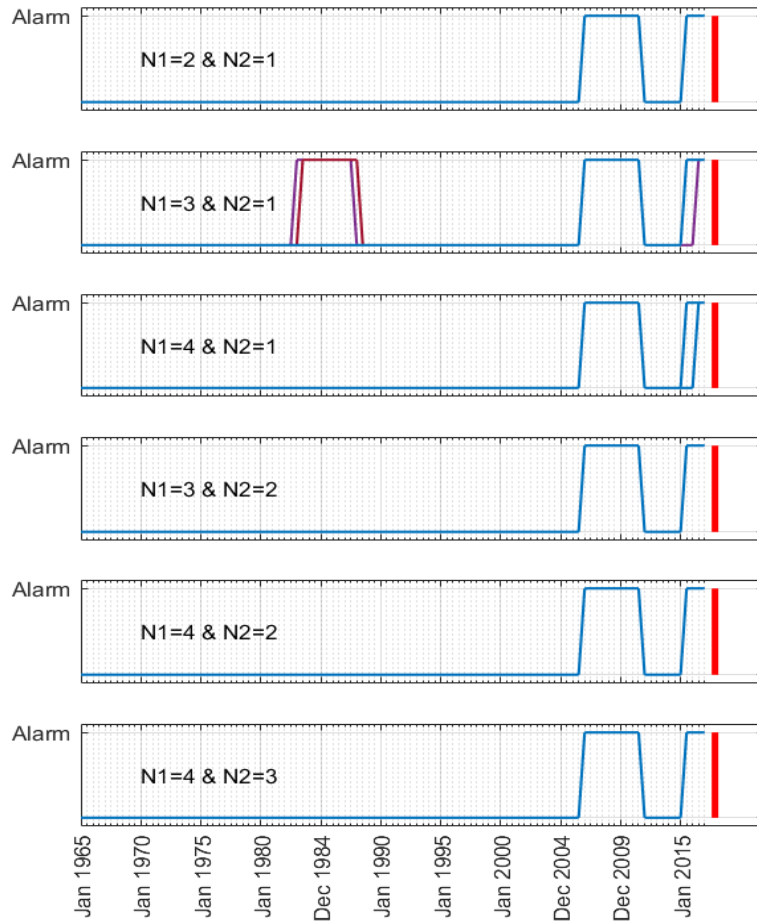


شکل ۲. نقشه‌های هشدار در تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۱ در شش حالت اجرای الگوریتم M8 (علامت ستاره رومرکز زلزله سرپل ذهاب است و مناطق سایه‌زده محدوده مکانی هشدار را نشان می‌دهند؛ همچنین نقاط مربعی واقع در قسمت‌های مرکزی هشدارها، نقاط بررسی هستند که در وضعیت هشدار قرار دارند، شدت رنگ مناطق هشدار نشان‌دهنده تعداد نقاط بررسی مسبب هشدار است).

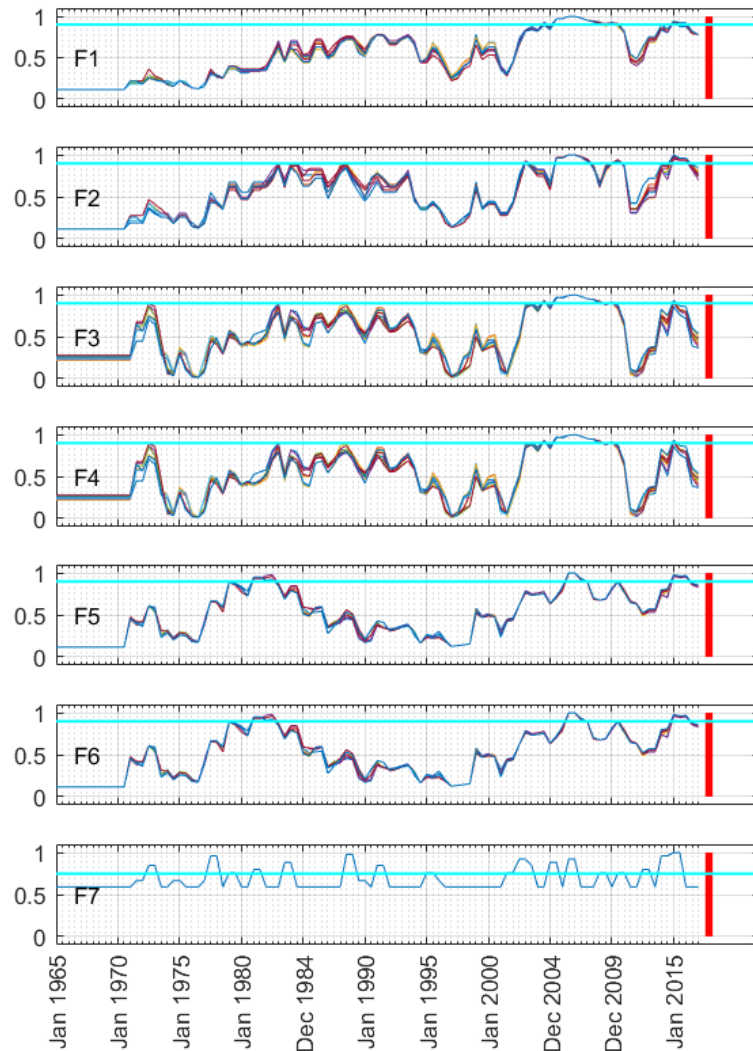
برای دستیابی به وضعیتی قابل اطمینان در ناحیه‌های هشدار، حالت‌های اجرای الگوریتم با دو رویکرد تلفیق شدند. در رویکرد اول، مناطق مشترک هشدار در همه حالت‌های اجرا، ناحیه هشدار تجمیع شده معرفی شد. شکل ۳ الف، منطقه تحت هشدار به دست آمده با این رویکرد است. در رویکرد دوم ابتدا نقاط بررسی که در تمام حالت‌های اجرا، در وضعیت هشدار قرار گرفتند، به عنوان نقاط هشدار واقعی و سپس مساحت ایجاد شده از دوایر بررسی این نقاط به عنوان ناحیه هشدار تجمیع شده معرفی شد. شکل ۳ ب نقاط هشدار مشترک و ناحیه هشدار تولید شده با این نقاط را نشان می‌دهد. در ادامه نیز وضعیت هشدار و مقادیر توابع الگوریتم M8 در نقاط هشدار مشترک، در طی زمان به شکل نمودار درآمد. شکل ۴ نمودارهای هشدار و شکل ۵ مقادیر توابع الگوریتم M8 در طی زمان است.



شکل ۳. نقشه‌های هشدار تجمیع شده از حالت‌های مختلف اجرای M8، مناطق سایه زده نواحی هشدار، علامت ستاره رومرکز زلزله سرپل ذهاب را نشان می‌دهد. الف) نقشه حاصل از اشتراک نواحی هشدار در تمام حالت‌های اجرای M8 ب) نقشه حاصل از اشتراک نقاط بررسی که در همه حالت‌ها در وضعیت هشدار قرار دارند (نقاطی که در نواحی مرکزی قسمت هشدار واقع شدند نقاط بررسی هستند که در همه حالت‌های اجرای الگوریتم در وضعیت هشدار قرار گرفتند).



شکل ۴. الگوی زمانی هشدار در نقاط بررسی مشترک. نمودارها وضعیت زمانی نقاط بررسی را که قبل از زلزلهٔ سرپل ذهاب در وضعیت هشدار قرار داشته‌اند نشان می‌دهند. هر قسمت از شکل مربوط به اجرای الگوریتم در یک حالت از مقادیر \bar{N}_1 و \bar{N}_2 است. موقعیت زمانی زلزلهٔ سرپل ذهاب با استفاده از یک خط عمودی ضخیم نمایش داده شده است.



شکل ۵. مقادیر توابع الگوریتم M8 در طی زمان برای نقاط بررسی مشترک و حالت $\tilde{N}_1 = 4$ و $\tilde{N}_2 = 3$.
 توابع الگوریتم M8 هستند و خط افقی حد آستانه هشدار برای هر تابع را نشان می‌دهد
 که در شش تابع اول برابر $0/9$ و در تابع F_7 برابر $0/75$ است. موقعیت زمانی زلزله سرپل ذهاب با
 استفاده از یک خط عمودی ضخیم نمایش داده شده است.

بحث و بررسی

موفقیت الگوریتم در پیش‌بینی زلزله به موقعیت نقاط بررسی بستگی دارد. به همین دلیل در اینجا سعی شد با یک شبکه چگال از نقاط بررسی حول زلزله هدف از تأثیر نبود نقطه بررسی کافی در جست‌وجوی لرزه‌خیزی کاسته شود. با توجه به لرزه‌خیزی کم فلات ایران، باید مقادیر \bar{N}_1 و \bar{N}_2 متناسب با این منطقه انتخاب شود؛ بنابراین با تغییر مقادیر این پارامترها از ۱ تا ۴ شش حالت برای این مقادیر در نظر گرفته شد. همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد تمام حالت‌های اجرای الگوریتم موقعیت زلزله سرپل ذهاب را در وضعیت هشدار قرار می‌دهند. الگوی مکانی هشدارها نشان می‌دهد در پنج حالت اجرا از شش حالت، موقعیت زلزله در شمال غربی ناحیه هشدار قرار دارد؛ بنابراین می‌توان گفت الگوریتم M8 قسمت شمال غربی منطقه زاگرس را در وضعیت هشدار قرار داده است.

مطابق شکل ۲، مرز محدوده هشدار در حالت‌های مختلف اجرا متفاوت است و همچنین در برخی حالت‌ها مانند $\bar{N}_1 = 4$ و $\bar{N}_2 = 1$ ، قرار گرفتن نقاط منفرد در وضعیت هشدار به افزایش چشمگیر محدوده هشدار الگوریتم منجر شده است. پس با توجه به نتایج، تغییرپذیری زیادی در محدوده هشدار نسبت به مقادیر پارامترهای ورودی دیده می‌شود؛ بنابراین در این تحقیق برخلاف تحقیقات گذشته به جای انتخاب یکی از حالت‌ها برای مقادیر پارامترهای ورودی از تلفیق نتایج آنها استفاده شد. این کار با دو هدف کاهش مساحت هشدار و افزایش اطمینان به هشدارها انجام گرفت. شکل ۳ که نتایج حاصل از دو رویکرد تلفیق است، بیانگر عملکرد بهتر رویکرد استفاده از نقاط بررسی مشترک در کاهش مساحت هشدار است. همان‌طور که در شکل ۳ ب مشخص است، نقاط بررسی نهایی از نظر مکانی نزدیک‌اند و می‌توان گفت این رویکرد تلفیق هشدارها در کاهش نویز و نقاط هشدار پراکنده نیز موفق عمل کرده است.

مطابق شکل ۳، رفتار زمانی هشدار در نقاط مشترک در حالت‌های مختلف اجرا بسیار شبیه است. دو محدوده زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ را می‌توان بازه‌های زمانی هشدار واقعی در نظر گرفت، چراکه در همه حالت‌های اجرا وضعیت یکسانی دارند. می‌توان در شکل ۳ دید که تفاوت این دو بازه زمانی در مقدار تابع $F7$ است، چون در بازه هشدار اخیر که به وقوع زلزله سرپل ذهاب منجر شده است، مقدار تابع $F7$ به حداکثر مقدار نسبی خود در طی زمان رسیده است. همان‌طور که در بخش الگوریتم M8 بیان شد، مقدار $F7$ مربوط به بیشینه تعداد پس‌لرزه (B) است؛ بنابراین می‌توان گفت افزایش تعداد پس‌لرزه، پیش‌نشانگر اصلی زلزله سرپل ذهاب - کرمانشاه بوده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به وقوع زلزله‌های بزرگ و آسیب‌پذیری زیاد فلات ایران از این حیث، هرگونه اقدام با هدف کاهش خسارات در این منطقه ضروری به نظر می‌رسد. یکی از رویکردهای بنیادی در این زمینه، استفاده از الگوهای لرزه‌ای مخاطاردهنده برای پیش‌بینی میان‌مدت زلزله‌های بزرگ است. این کار در قالب الگوریتم‌های پیش‌بینی زلزله انجام می‌گیرد. در اینجا از الگوریتم M8 به منظور بررسی زلزله سرپل ذهاب استفاده شد و نتایج نشان داد که این زلزله در بازه زمانی میان‌مدت پیش‌بینی‌پذیر بوده است و یک پیش‌بینی بازنگرانه موفق به کارنامه الگوریتم M8 در فلات ایران اضافه شد. نتایج نشان داد که استفاده از شبکه‌ای متراکم از نقاط بررسی و تلفیق نواحی هشدار حاصل از حالت‌های مختلف اجرای الگوریتم M8 موجب کاهش عدم قطعیت مکانی محدوده هشدار می‌شود. علاوه بر این، با این رویکرد، وابستگی نواحی هشدار به مقادیر پارامترهای ورودی الگوریتم کاهش و اطمینان به نتایج افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش بیشینه تعداد پس‌لرزه، مهم‌ترین پیش‌نشانگر لرزه‌ای زلزله سرپل ذهاب است. تلفیق نتایج الگوریتم M8 به صورت یکپارچه در منطقه فلات ایران برای همه زلزله‌های بزرگ گذشته در این منطقه به عنوان موضوع تحقیق به پژوهشگران علاقه‌مند پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [۱] شادمنان، نوید؛ میرزایی، نوربخش؛ قدس، عبدالرضا؛ و کشوری، فروغ (۱۳۸۵). «پیش‌بینی‌های میان‌مدت زمین‌لرزه در ایران براساس الگوریتم M8». *مجله فیزیک زمین و فضا*. ۳۲. ۱. ص ۳۷-۴۸.
- [۲] شادمنان، نوید؛ میرزایی، نوربخش؛ قدس، عبدالرضا؛ نگارستانی، علی؛ کشوری، فروغ (۱۳۸۵). «کاهش عدم قطعیت مکانی در الگوریتم M8 با استفاده از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه». *مجله فیزیک زمین و فضا*. ۳۲. ۱. ص ۲۷-۳۶.
- [۳] مجرب، مسعود؛ معماریان، حسین؛ زارع، مهدی؛ کوسوبوکوو، ولادیمیر (۱۳۹۳). «بررسی عملکرد الگوریتم M8 در پیش‌بینی زلزله‌های بزرگ باختر فلات ایران». *فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین*. ۲۴، ۹۴. ص ۲۰-۱۳.
- [4] Berberian, Manuel. (2014). Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau, Elsevier, 978-0-444-63297-5, Volume 17 - 1st Edition
- [5] Keilis-Borok, Vladimir I. (1996). Intermediate-term earthquake prediction. Proceedings of the National Academy of Sciences, 93, 9, 3748-3755.
- [6] Keilis-Borok, Vladimir I.; Kossobokov, Vladimir. (1990). Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8. Physics of the Earth and Planetary

- Interiors, 61, 1, 73–83, 10.1016/0031-9201(90)90096-G
- [7] Keilis-Borok, Vladimir I.;Kossobokov, Vladimir. (1990). Times of increased probability of strong earthquakes ($M \geq 7.5$) diagnosed by Algorithm M8 in Japan and adjacent territories. *Journal of Geophysical Research*, 95, B8, 12413, 10.1029/JB095iB08p12413
- [8] Keilis-Borok, Vladimir I.; Kossobokov, Vladimir. (1987). Periods of high probability of occurrence of the world's strongest earthquakes. *Computational Seismology*, 19, 45–53.
- [9] Keilis-Borok, Vladimir I.; Rotwain, I. M. (1990). Diagnosis of Time of Increased Probability of strong earthquakes in different regions of the world: algorithm CN. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 61, 1, 57–72, 10.1016/0031-9201(90)90095-F
- [10] Keilis-Borok, Vladimir I.;Soloviev, Alexandre A. (2013). *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer Science & Business Media, 978-3-662-05298-3
- [11] Kossobokov, Vladimir. (1997). User manual for M8. Algorithms for Earthquake Statistics and Prediction, edited by: Healy, JH, Keilis-Borok, VI, and Lee, WHK, 6, 167–222.
- [12] Latoussakis, J.;Kossobokov, Vladimir. (1990). Intermediate term earthquake prediction in the area of Greece: Application of the algorithm M8. *pure and applied geophysics*, 134, 2, 261–282. 10.1007/BF00877001
- [13] Mojarab, Masoud;Kossobokov, Vladimir;Memarian, Hossein;Zare, Mehdi. (2015). An application of earthquake prediction algorithm M8 in eastern Anatolia at the approach of the 2011 Van earthquake. *Journal of Earth System Science*, 124, 5, 1047–1062. 10.1007/s12040-015-0584-7
- [14] Mojarab, Masoud;Memarian, Hossein;Zare, Mehdi. (2015). Performance evaluation of the M8 algorithm to predict M7+ earthquakes in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 8, 5921–5934.
- [15] Mojarab, Masoud;Memarian, Hossein;Zare, Mehdi;Kossobokov, Vladimir. (2014). Adjusting the earthquake prediction algorithm M8 for application in Iranian Plateau with special reference to the 16 April 2013. M7.
- [16] Mojarab, Masoud;Zare, Mehdi;Kossobokov, Vladimir. (2017). Adjusting the M8 algorithm to earthquake prediction in the Iranian plateau. *Journal of Seismology*, 1–20.
- [17] Peresan, A.;Kossobokov, V.;Romashkova, L.;Panza, G. F. (2005). Intermediate-term middle-range earthquake predictions in Italy: a review. *Earth-Science Reviews*, 69, 1–2, 97–132. 10.1016/j.earscirev.2004.07.005
- [18] Romachkova, L. L.;Kossobokov, Vladimir G.;Panza, G. F.;Costa, G. (1998). Intermediate-term Predictions of Earthquakes in Italy: Algorithm M8. *pure and applied geophysics*, 152, 1, 37–55. 10.1007/s000240050140
- [19] Tiampo, Kristy F.;Rundle, John B.;McGinnis, Seth A.;Klein, William. (2002). Pattern dynamics and forecast methods in seismically active regions. *Earthquake Processes: Physical Modelling, Numerical Simulation and Data Analysis Part II*, 2429–2467.