توسعه روش جدید پیش‌یابی مکانی توالی زمین‌لرزه‌ها در فلات ایران با ترکیب مدل‌های آماری و فیزیکی

حمید زعفرانی
استاد پژوهشکده زلزله‌شناسی *h.zafarani@iiees.ac.ir*

مجید معهود، بهنام ملکی آسایش

وقوع رخدادهای آتی و پس‌لرزه‌های پیرو یک زمین‌لرزه بزرگ بیشتر ناشی از تغییر تنش استاتیکی و همچنین اثرات دیگری مانند فرآیندهای دینامیکی و پسالرزه‌ای می‌باشد. استفاده از تئوری تغییرات تنش کولمب یکی از موفق‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای پیش‌یابی مکانی رخدادهای بزرگ آتی و پس‌لرزه‌ها می‌باشد. از طرفی دیگر آنالیزهای اخیر پیش‌یابی‌های باینری پس‌لرزه‌ها نشان داد که رهیافت‌های کلاسیک مانند محاسبه تغییرات تنش کولمب بر روی صفحات گیرنده مشخص (مانند صفحه گسل اصلی یا صفحات بهینه) بهترین رهیافت نبوده و اسکالرهای تنش مستقل از مکانیسم گیرنده مانند بیشینه تنش برشی (Maximum Shear) و تنش وان- میس (von-Mises stress) عملکرد بهتری دارند. با این وجود، این نتایج نیز به خاطر استفاده از آنالیز مشخصه عملیاتی گیرنده (Receiver Operating Characterstic) که برای داده‌های نامتعادل لرزه‌ای مناسب نمی‌باشد، زیر سؤال رفتند. در این مطالعه، از تئوری تنش کولمب به منظور پیش‌یابی مکانی بلندمدت و کوتاه‌مدت زمین‌لرزه‌ها استفاده شده است. بدین منظور، تنش کولمب را بر روی صفحات مشخص مانند صفحه اصلی گسل (Master fault) صفحات با جهت بهینه (Optimally Oriented Plane) و صفحات با مکانیسم متغیر (Varaieble Mechanism) اعمال کردیم. همچنین از اسکالرهای تنش مستقل از صفحات گیرنده (بیشینه تنش برشی و تنش وان- میس) و نیز مدل احتمالاتی فاصله- لغزش (Varaieble Mechanism) برای پیش‌یابی مکانی پس‌لرزه‌ها استفاده گردید. به منظور توسعه مدل جدید پیش‌یابی در فلات ایران در محاسبات تنش علاوه بر تنش حاصل از زمین‌لرزه اصلی تنش‌های ثانویه حاصل از پس‌لرزه‌ها را هم در نظر گرفته و با ترکیب این مدل‌های فیزیکی با مدل آماری، مدل ترکیبی جدیدی را برای پیش‌یابی مکانی پس‌لرزه‌ها توسعه داده شد. علاوه بر توسعه این مدل جدید، به منظور جبران نقایص دسته بندی کننده ROC (Classifier)، از معیار تازه معرفی شده MCC-F1 برای اولین بار در داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است.

مدل فیزیکی تغییرات تنش کولمب برای توالی لرزه‌ای در شرق ایران در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۷ به منظور پیش‌یابی مکانی بلندمدت زمین‌لرزه به کار برده شده و نتایج حاصل حاکی از توانمندی این روش در پیش‌یابی مکانی رخدادهای آتی بود. همچنین بکارگیری این مدل برای پیش‌یابی مکانی پس‌لرزه‌ها برای تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ در فلات ایران علی رغم بالا بودن عدم‌قطعیت‌ها و زیر سؤال برده شدن این مدل با روش‌های دیگر فیزیکی نشان از همبستگی بین تغییرات تنش و توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها داشت. علاوه بر این، در نظر گرفتن تنش‌های ثانویه ناشی از پس‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه ۲۰۰۳ بم در محاسبات تنش باعث

Development of New Spatial Earthquakes Sequence Forecasting Method in Iranian Plateau Based on Combined Statistical and Physical Methods

Hamid Zafarani
Professor, Seismology Research Center
h.zafarani@iiees.ac.ir

Majid Mahood, Behnam Maleki Asayesh

As one of the seismically active regions in the Alpine-Himalayan belt, the Iranian plateau has experienced destructive earthquakes throughout its history. Historical and instrumental earthquakes confirm the high probability of occurrence of earthquakes in Iran and consequences risks and damages. Therefore, it is important to pay attention to the issue of seismic and risk analysis on the Iranian plateau in order to reduce the loss of life and property. Earthquake forecasting and accurate estimation of the probability of the occurrence of the future events is the first and most important part of seismic risk analysis. For this purpose, despite the long term forecasting based on destructive potential of aftershocks, we should consider the short term forecasting of aftershocks in our analysis. Therefore, it is necessary to apply the different forecasting methods for Iranian plateau by considering all the factors and develop them based on tectonical condition.

Occurrence of the future events or aftershocks is due to static, dynamic, and post seismic stresses. Despite large uncertainties associated with the calculation of Coulomb failure stress changes (ΔCFS), it is the most commonly used method for predicting spatial distributions of aftershocks. Recent studies showed that classical Coulomb failure stress maps are outperformed by alternative scalar stress quantities, as well as a distance-slip probabilistic model (R). However, these test results were based on the receiver operating characteristic (ROC) metric, which is not well suited for imbalanced data sets such as aftershock distributions. Furthermore, the previous analyses also ignored the potential impact of large secondary earthquakes. In this study, the Coulomb failure stress changes for long-term and aftershocks forecasting in Iranian plateau is used. Then, we used receiver dependent stress metrics such as Coulomb stress changes on master fault (MAS), optimally oriented planes (OOP), variable mechanism (VM), receiver independent stress scalars including maximum shear (MS), von-Mises stress (VMS), and R model for aftershocks spatial binary forecasting. Furthermore, these methods were developed by considering secondary stress due to large

aftershocks based on either uniform or Omori-type weights and considering MCC-F1 as classifier.

By applying classical Coulomb stress changes for the earthquake sequence in the east of Iran including 12 events from 1981 to 2017, it was shown that this physic-based method forecasted the location of the future large events very well. Also applying this method for aftershocks' spatial forecasting due to some moderate to large events in Iranian plateau revealed good correlation between Coulomb stress changes and aftershocks distribution. The capability of this method for Bam earthquake by considering secondary stress improved. In the next step for 2017-2019 Kermanshah sequence, the classical Coulomb failure stress, alternative stress scalars, and R forecast models was applied and the more appropriate MCC-F1 metric was used to test the prediction accuracy, Figure (1). It was observed that the receiver independent stress scalars (maximum shear and von-Mises stress) perform better than the classical CFS values relying on the specification of receiver mechanisms (ΔCFS resolved on master fault, optimally oriented planes, and variable mechanism). However, detailed analysis based on the MCC-F1 metric revealed that the performance depends on the grid size, magnitude cutoff, and test period. Increasing the magnitude cutoff and decreasing the grid size and test period reduces the performance of all methods. Finally, it was found that the performance of all methods except ΔCFS resolved on master fault and optimally oriented planes improved when the source information of large aftershocks is additionally considered, with stress-based models outperforming the R model. Our results highlighted the importance of accounting for secondary stress changes in improving earthquake forecasts.

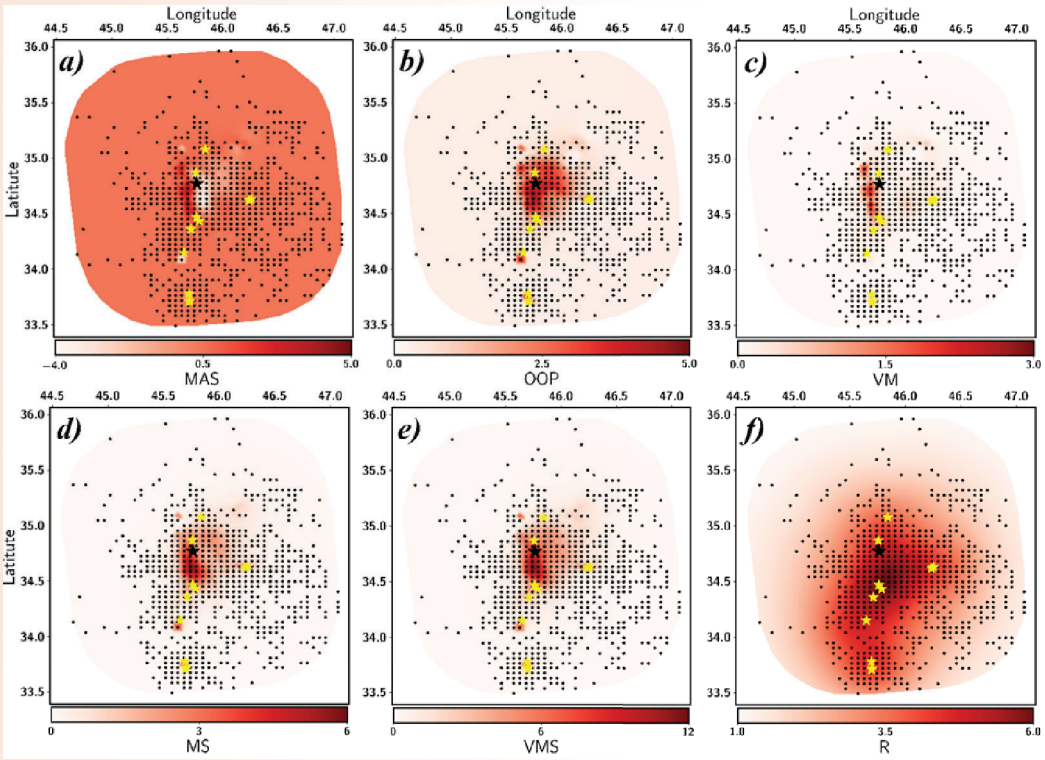
Keywords: Spatial earthquakes sequence, Forecasting method, Iranian plateau, Combined statistical and Physical methods

بهبود این مدل پیش‌یابی گردید. به منظور بررسی دیگر روش‌های پیش یابی در فلات ایران اسکالرهای تنش و مدل احتمالاتی فاصله-لغزش برای توالی لرزه‌ای کرمانشاه (۲۰۱۷/۱۱/۱۲-۲۰۱۹/۰۷/۰۴) به کار برده شد. بر اساس آنالیز MCC-F1 که در این مطالعه به جای آنالیز ROC برای داده‌های لرزه‌ای معرفی گردید، مشاهده شد که مدل احتمالاتی R و اسکالرهای تنش مستقل از گسل گیرنده (MS و VMS) بهتر از معیارهای تنش وابسته به گسل گیرنده (MAS، OOP و VM) عمل می‌کنند. با این وجود معیار تنش بر روی صفحات با مکانیسم متغیر عملکرد خوبی در پیش‌یابی مکانی پس‌لرزه‌ها دارد. در نظر گرفتن نقش پس‌لرزه‌های بزرگ در توزیع مکانی دیگر پس‌لرزه‌ها با توسعه مدل ترکیبی از اسکالرهای تنش و رابطه زوال اموری نشان داد که توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها علاوه بر این که تابع تنش ناشی از زمین‌لرزه اصلی می‌باشد، به تنش‌های ثانویه حاصل از پس‌لرزه‌ها با در نظر گرفتن مدل آماری زوال اموری (Omori) وابسته هستند. در نظر گرفتن تنش‌های ثانویه باعث بهبود عملکرد مدل‌های پیش‌یابی شده و اسکالرهای تنش بیشنه تنش برشی و تنش وان-میس بهترین نتایج را برای پیش‌یابی مکانی پس‌لرزه‌ها به دست دادند.

نقشه MAS یک همبستگی بین توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها و تغییرات تنش مثبت نشان می‌دهد، شکل(۱a). با این وجود مناطقی با تغییرات تنش مثبت وجود دارد که هیچ پس‌لرزه‌ای در آن رخ نداده است و علاوه بر آن تعدادی پس‌لرزه نیز در مناطق سایه تنش رخ داده‌اند. نقشه‌های OOP و VM شبیه به نقشه الگوی تنش MAS بوده با این تفاوت که نقشه OOP دارای مقادیر استرس بالا در منطقه وسیعی می‌باشد، شکل (۱b و c). نقشه‌های MS و VMS شکل (۱d و e) مقادیر بالای تنش را هم در نزدیکی صفحه گسلی و هم در فواصل دور صفحه گسلی دارند. الگوی توزیع تنش این دو معیار بسیار شبیه می‌باشد که توضیحی برای تقریباً یکسان بودن آنالیزهای ROC و MCC-F1 این دو اسکالر می‌باشد. از طرف دیگر، مدل R انتظار تعداد پس‌لرزه بالا در نزدیکی گسیختگی داردکه به طور یکنواخت با افزایش فاصل کاهش می‌یابند (شکل۱f). از مقایسه این نقشه‌ها با الگوی توزیع تنش حاصل از زمین‌لرزه اصلی می‌توان مشاهده کرد که رخدادهای ثانویه باعث افزایش تنش خصوصا در نزدیکی رخدادهای بزرگ می‌شوند. با استفاده از ترکیب مدل‌های فیزیکی وابسته به تنش که علت چکانش زمین‌لرزه‌ها می‌باشند با روش‌های آماری بر اساس مدل اموری (Omori)، با در نظر گرفتن تنش‌های ناشی از رخداد اصلی و همچنین پس‌لرزه‌های بزرگ و مدل آماری مدل ترکیبی جدیدی ارائه شد که نتایج بهتری نسبت به روش‌های قبلی دارد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌یابی مکـانی، توالی زمین‌لـرزه‌ها، فلات ایران، مدل‌های آماری و فیزیکی

unesco
Category 2 Centre under the auspices of UNESCO
RCECWA
Regional Education and Research Center on Earthquake Risk Management and Resilience for West and Central Asia
International Institute of Earthquake Engineering and Seismology



شکل (۱): نقشه برهم نهی شده پیش‌یابی برای رخداد اصلی و پس‌لرزه‌ای بزرگ ($Mw \geq 5$) طی توالی ۲۰۱۷-۲۰۱۹ کرمانشاه در عمق ۹ کیلومتری. a-f) به ترتیب مقادیر MAS، OOP، VM، VMS و R. دوایر سیاه رنگ نشان‌دهنده گریدهایی هستند که حداقل یک پس‌لرزه در باز عمقی ۱± در طول توالی در آن رخ داد است. ستاره بزرگ مشکی رنگ نشان‌دهنده رومرکز زمین‌لرزه اصلی ازگله و ستاره‌های کوچک زرد رنگ نشان‌دهنده پس‌لرزه‌های بزرگ (≥۵) در این توالی می‌باشند