

ارزیابی کیفیت ثبت داده‌های شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن و تأثیر آن در بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها در محدوده استان زنجان

عبدالرضا قدس^{۱*} و روح‌اله عسکری^۲

^۱ دانشیار، گروه علوم زمین، دانشگاه علوم پایه زنجان، ایران
^۲ مربی، گروه علوم زمین، دانشگاه علوم پایه، زنجان ایران

(دریافت: ۸۶/۸/۲۹، پذیرش نهایی: ۸۷/۴/۳)

چکیده

در این تحقیق هدف این است که با تلفیق داده‌های شبکه شتاب‌نگاری با داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، امکان بهبود مکان‌یابی زلزله‌های استان زنجان و نواحی مجاور (چهارگوش محدود به عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۳۷٫۵ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۶٫۵ تا ۵۰٫۵ درجه شرقی) مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این تحقیق روشن ساخت که داده‌های شبکه شتاب‌نگاری در منطقه بررسی دارای پتانسیل نسبتاً ضعیفی برای بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها است؛ زیرا اکثر گسل‌های منطقه مورد بررسی در راستای بیشترین پوشش آزمون‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری قرار گرفته‌اند و اضافه کردن داده‌های شتاب‌نگاری، تأثیر اندکی در بهبود پوشش آزمون‌های زلزله‌ها دارد. با توجه به نتایج این تحقیق، عملکرد شبکه در نگهداری دستگاه‌های شبکه و استخراج و نگهداری داده‌ها در سطح قابل قبولی است. هر چند که اشکالات مهمی در نحوه عرضه داده‌های رقمی، قابل مشاهده است. همچنین با بررسی شکل موج‌های رکوردهای شتاب‌نگاری مشاهده شد که دامنه امواج ثبت شده دارای دقت تفکیک کافی نیست و نمی‌توان زمان رسیدن امواج لرزه‌ای را با دقت بیشتر از ۰٫۲ ثانیه تعیین کرد.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی زلزله، شبکه شتاب‌نگاری، شبکه زلزله‌نگاری، مدیریت شبکه‌های زلزله‌شناسی

Evaluation of Iran Strong Motion Network (ISMN) recording and its effects on the improvement of earthquake location in Zanjan and its neighboring regions

Ghods, A. R.¹ and Askari, R.²

¹Associate Professor, Department of Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

²Instructor, Department of Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

(Received: 20 Nov 2007, Accepted: 23 Jun 2008)

Abstract

By merging the data from the University of Tehran's Iran Seismic Telemetry Network (ISTN) with those from Iran Strong Motion Network (ISMN), we investigate the improvement of earthquake location accuracy for the events which happened in the Zanjan province and its neighboring regions (the region bounded by 35°-37.5° N latitudes and 46.5°-50.5° E longitudes and for the period 1996-2006). Due to insufficient distribution of seismic stations in the study region, most of the events have poor

azimuthal coverage and location accuracy. The events in the Zanjan province are largely recorded by Tehran and Tabriz seismic sub-networks of ISTN in the east and west of the province, respectively. ISMN has a very good coverage within Zanjan and its neighboring provinces, and thus has a promising potential to improve the location accuracy of the events within the Zanjan province.

In this study, we assess the improvement of location accuracy by merging the ISMN data with the catalog of relocated events for Zanjan and its neighboring provinces (Askari and Ghods, 2007). The catalog consists of 304 events for the period 1996-2006, with local magnitudes larger than 3.1, and RMS of less than 0.7 s. The catalog is complete for magnitudes larger than 3.5. ISMN is an offline network and does not use GPS for precise timing of its waveform records. We first associate ISMN waveforms based on their time tag but later check if the phase readings are consistent with the phase readings from ISTN. Due to the lack of precise timing of ISMN waveforms, only relative phase arrival of Sg-Pg could be participated in the location procedure. We were able to associate 403 ISMN records with 76 events of the catalog.

We find that the ISMN data cannot significantly improve earthquake location in the Zanjan region. Out of 76 events with the ISMN data, azimuthal coverage and epicentral accuracy of 7 events could be improved significantly. This is primarily related to the fact that most of the regional faults are more or less aligned with the direction of the spread of the weak-motion seismic networks in east and west of the province. We found that ISMN could detect all events with magnitude above 4 within the study region. According to our results, the ISMN stations have been maintained properly, and we could not detect significant data loss. However, we could detect several problems in archiving the ISMN data. We have also found that the ISMN instruments do not have enough resolution for accurate recording of seismic amplitudes. This implies that picking of the first arrivals on ISMN waveforms may have errors in the range of 0.2-0.4 seconds.

Key words: Earthquake location, Strong motion network, Weak motion network, Seismic network management

۱ مقدمه

جغرافیایی خوبی در سطح استان است (شکل ۱) و در محدوده زمانی ۱۹۹۶-۲۰۰۶ فعال بوده و با توجه به تأثیر پوشش آزمون‌تی بر بهبود مکان‌یابی زلزله (شیر، ۱۹۹۹ و بورمن، ۲۰۰۲)، به نظر می‌رسد که تلفیق داده‌های شبکه شتاب‌نگاری با داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری، دقت مکان‌یابی زلزله‌های مورد بررسی را افزایش دهد. فرض ما این است که تلفیق داده‌های دو نوع شبکه پیش‌گفته منجر به افزایش پوشش آزمون‌تی زلزله‌ها و در نتیجه بهبود مکان‌یابی می‌شود.

در این تحقیق با تلفیق داده‌های شبکه شتاب‌نگاری با کاتالوگ زلزله‌های دوباره مکان‌یابی شده (عسکری و

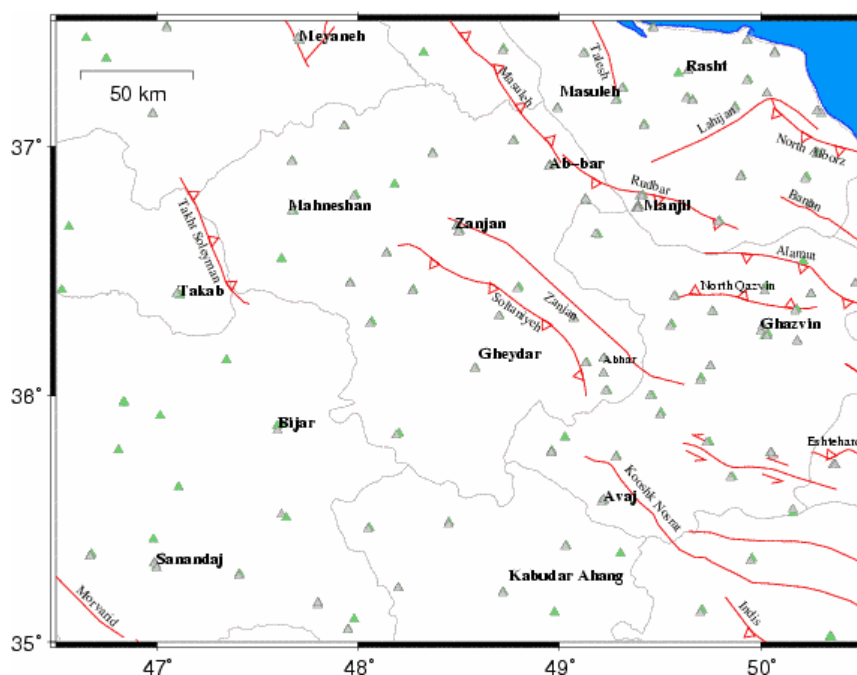
در استان زنجان تا قبل از مهر ماه سال ۱۳۸۶ هیچ ایستگاه لرزه‌نگاری وجود نداشته است. همچنین پراکندگی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در اکثر استان‌های مجاور استان زنجان در وضعیت مطلوبی نیست. فقط استان تهران در شرق و استان آذربایجان غربی در غرب منطقه دارای شبکه‌های محلی قابل قبولی هستند. شبکه لرزه‌نگاری استان کرمانشاه در جنوب منطقه از سال ۲۰۰۴ شروع به کار کرده است، لذا اکثر زلزله‌های روی داده در فاصله زمانی ۱۹۹۶-۲۰۰۴ دارای پوشش آزمون‌تی نسبتاً نامطلوبی هستند.

از آنجاکه شبکه شتاب‌نگاری دارای پوشش

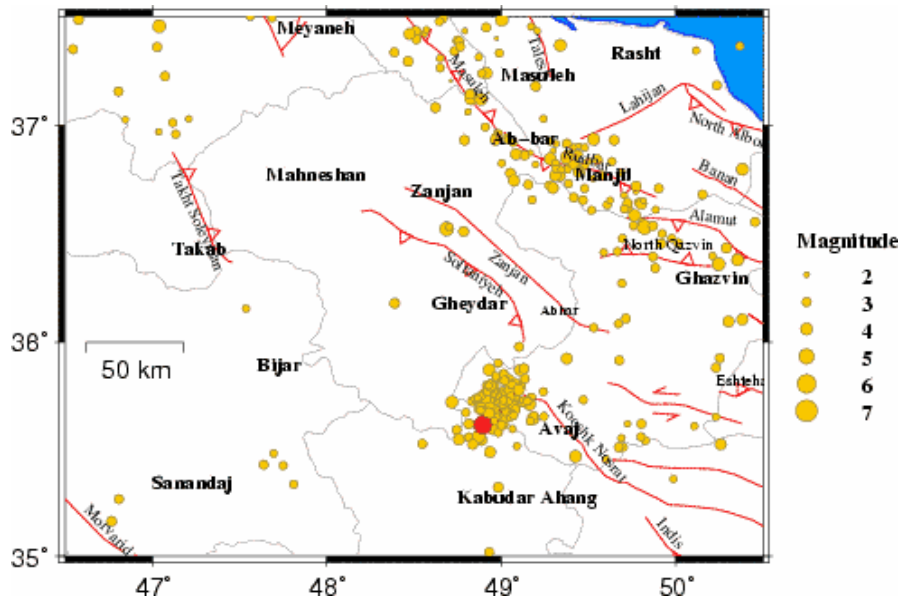
مجموعه بررسی‌های آماری روی داده‌های منتشر شده برای منطقه مورد تحقیق است. علاوه بر ارزیابی کارایی شبکه در مکان‌یابی دقیق زلزله‌ها می‌خواهیم به سؤال‌هایی که در پی می‌آید پاسخ دهیم (۱) از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری موجود در منطقه مطالعاتی چه تعداد دارای ثبت لرزه‌ای هستند؟ (۲) پراکندگی زلزله‌هایی که با شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری ثبت شده چگونه است؟ (۳) از چه بزرگایی به بعد شبکه شتاب‌نگاری همواره قابلیت ثبت زلزله را دارد؟ (۴) حساسیت دستگاه‌های لرزه‌نگاری با فاصله از رومرکز زلزله چگونه تغییر می‌کند؟ (۵) شبکه در چه محدوده از منطقه مطالعاتی دارای تراکم کافی نیست؟ (۶) آیا مدیریت شبکه در جمع‌آوری داده‌های شتاب‌نگاری خوب عمل کرده است؟ هدف از این تحقیق ایجاد الگویی برای ارزیابی عملکرد شبکه شتاب‌نگاری در منطقه زنجان است.

قدس، ۱۳۸۶) در استان زنجان و نواحی مجاور (چهارگوش محدود به عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۳۷٫۵ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۶٫۵ تا ۵۰ درجه شرقی) بهبود مکان‌یابی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. عسکری و قدس (۱۳۸۶) با مطالعه ۳۵۳ زلزله با بزرگای بزرگ‌تر از ۳٫۱ استخراج شده از بانک داده مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۳۰۴ زلزله را (شکل ۲) با استفاده از نرم‌افزار SEISAN (هاوسکوف و اوتمولر، ۲۰۰۳) با دقت خطای RMS کمتر از ۰٫۷ ثانیه دوباره مکان‌یابی کردند. بزرگای اولیه این زلزله‌ها با استفاده از رابطه هوتون و بور (۱۹۸۷) محاسبه شده است.

در این تحقیق همچنین نحوه عملکرد شبکه لرزه‌نگاری رومی سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن مورد ارزیابی علمی قرار می‌گیرد. روش کار ما بر پایه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی شتاب‌نگارهای منطقه استان زنجان (مثلث‌ها). تعداد کل شتاب‌نگارها برابر با ۱۲۹ عدد است که از این تعداد ۱۱۲ عدد (مثلث‌های خاکستری) دارای حداقل یک یا تعداد بیشتری ثبت هستند. مثلث‌های سبز، ۱۷ شتاب‌نگاری را که هنوز هیچ موردی ثبت نکرده‌اند را مشخص می‌کنند. مشخصات شتاب‌نگارها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲. موقعیت رومرکز زلزله‌های دوباره مکان‌یابی شده برای منطقه عمومی زنجان. از کل ۳۵۳ مورد زلزله مکان‌یابی شده ۳۰۴ مورد در داخل منطقه دوباره مکان‌یابی شده‌اند که در شکل بالا نمایش داده شده است. زلزله آوج (دایره سرخ) بزرگ‌ترین زلزله‌ای است که در محدوده زمانی مورد تحقیق (۱۹۹۶-۲۰۰۶) در منطقه مورد تحقیق اتفاق افتاده است. بزرگای زلزله آوج در مقیاس بزرگای محلی ۵٫۷ ML برآورد شده است.

رقمی‌سازهای ۱۲ بیتی هستند. با توجه به ۱۲ بیتی بودن رقمی‌ساز به کار رفته در دستگاه‌های شتاب‌نگار سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن دامنه حساسیت آنها ۷۲db است که در مقایسه با دامنه حساسیت دستگاه‌های شتاب‌نگار امروزی‌تر که در شبکه‌های شتاب‌نگاری کشورهایی به مانند آمریکا، فرانسه و ترکیه به کار می‌رود، دامنه حساسیت کمی است. اکثر دستگاه‌های شتاب‌نگار در حال حاضر درون ساختمان‌های دولتی نصب شده‌اند و از راه ارتباط مودم از راه دور قابل دسترسی و کنترل هستند. این دستگاه‌ها به‌طور پیوسته شتاب زمین را مشاهده می‌کنند و هرگاه بیشینه شتاب بیش از $0.1g$ باشد، داده‌های شتاب‌نگاری را به صورت یک فایل در حافظه محلی دستگاه ثبت می‌کنند. داده‌های هر ایستگاه از راه ارتباط مودم به سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن منتقل و در درون فایلی با یک شماره یکتا ذخیره می‌کنند. شماره فایل ربطی به زمان وقوع زلزله ندارد. بایگانی داده‌ها

۲ مروری بر نحوه ثبت داده‌ها در شبکه شتاب‌نگاری

کشوری (اطلاعات ارائه شده در مورد نحوه کارکرد شبکه شتاب‌نگاری حاصل ارتباطات شخصی نگارندگان مقاله با آقای مهندس حسین میرزایی (mirzaei@bhrc.ac.ir) از سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن است).

دستگاه شتاب‌نگار دستگاهی است که قادر به ثبت جنبش نیرومند زمین (strong motion) است (لای و والاس، ۱۹۹۵). شبکه شتاب‌نگاری ایران را سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن (www.bhrc.ac.ir) وابسته به وزارت مسکن و شهرسازی اداره می‌کند. در حال حاضر این شبکه شامل بیش از ۱۰۰۰ دستگاه شتاب‌نگار رقمی است که در مقایسه با شبکه‌های شتاب‌نگاری کشورهای همسایه و حتی کشورهای اروپایی و آمریکا، شبکه بسیار متراکمی است. این شبکه در محدوده استان زنجان و استان‌های مجاور (شکل ۱) دارای ۱۲۹ شتاب‌نگار است. شتاب‌نگارهای رقمی سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن همگی از نوع SSA2 کینمتریکس‌اند که مجهز به

بزرگ‌ترین مشکل شبکه منتسب کردن رکوردهای ثبت شده به زلزله‌های اتفاق افتاده است. معمولاً بعد از هر دوره گردآوری ثبت‌ها از تمام شبکه، در مرکز شبکه، با یک تعداد از ثبت‌های شکل‌موج مواجه هستیم که هنوز به زلزله یا زلزله‌های خاصی منتسب نشده‌اند. به‌علت استفاده نکردن از GPS در زمان‌دهی، داده‌های شتاب‌نگاری دارای زمان مطلق درستی نیستند و لذا منتسب کردن شکل موج‌های گردآوری شده به زلزله‌ها همواره همراه با خطا است. بجز در مورد زلزله‌های بزرگ که تعداد ثبت‌ها و پراکندگی جغرافیایی ایستگاه‌های تولید کننده ثبت‌های شتاب‌نگاری در آنها مطلوب است، امکان مکان‌یابی زلزله‌ها با استفاده از اطلاعات شکل‌موج ثبت‌های شتاب‌نگاری ممکن نیست. زلزله‌های کوچک‌تر فقط منجر به تحریک یک یا دو ایستگاه شتاب‌نگاری می‌شوند. در حال حاضر ثبت‌های شتاب‌نگار به‌صورت دستی بعد از مطابقت با اطلاعات شبکه‌های لرزه‌نگاری محلی و جهانی به یک زلزله خاص منتسب می‌شوند. موارد قابل توجهی از ثبت‌های شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن به علت نقصان اطلاعات شبکه‌های لرزه‌نگاری و یا نبود مکان‌یابی دقیق، با شبکه‌های لرزه‌شناسی به زلزله خاصی منتسب نشده‌اند.

۳ روش کار

به‌منظور ارزیابی حساسیت شبکه شتاب‌نگاری در ثبت زلزله‌ها، داده‌های دو شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری با هم تلفیق شد و آستانه کامل بودن برای زلزله‌هایی که توسط هر دو شبکه ثبت شده، تعیین شد. بزرگایی که زلزله‌های بزرگ‌تر از آن همگی با یک شبکه ثبت شوند، بزرگای آستانه کامل بودن نامیده می‌شود. فرض اصلی ما در این ارزیابی این است که شبکه‌های لرزه‌نگاری ایران همه زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۳٫۵ که در محدوده زمانی ۱۹۹۶ الی ۲۰۰۶ در منطقه مورد تحقیق روی داده را

براساس سال و رویداد صورت نمی‌گیرد و همگی در یک پوشه قرار می‌گیرند. کاربر معمولاً با جدول‌های جداگانه‌ای باید اطلاعات مربوط به زمان و مکان رویداد را بیابد. هر فایل شتاب‌نگار مشخصات ایستگاه، مشخصات زمان وقوع و کانون زلزله و ایستگاه ثبت‌کننده به همراه مشخصات دستگاهی شتاب‌نگار و خود داده رقمی را در بر می‌گیرد. اسم اختصاری ایستگاه لرزه‌نگار در درون فایل داده نیامده است. اطلاعات تکمیلی دیگری نظیر اینکه منبع تعیین رومرکز زلزله و بزرگای آن چه ارگانی بوده است نیز در داخل فایل داده گنجانده نشده است. این اطلاعات به‌صورت فایل‌های صفحات گسترده اکسل در اختیار کاربران قرار می‌گیرد. برخلاف شبکه‌های لرزه‌نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (<http://irsc.ut.ac.ir>) هنوز داده‌های رقمی شتاب‌نگاری از راه شبکه در اختیار کاربران قرار نمی‌گیرد. متقاضیان داده‌های شتاب‌نگاری معمولاً با ارسال نامه درخواستی به سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن می‌توانند به داده‌های شتاب‌نگاری رقمی مورد نظرشان دسترسی پیدا کنند.

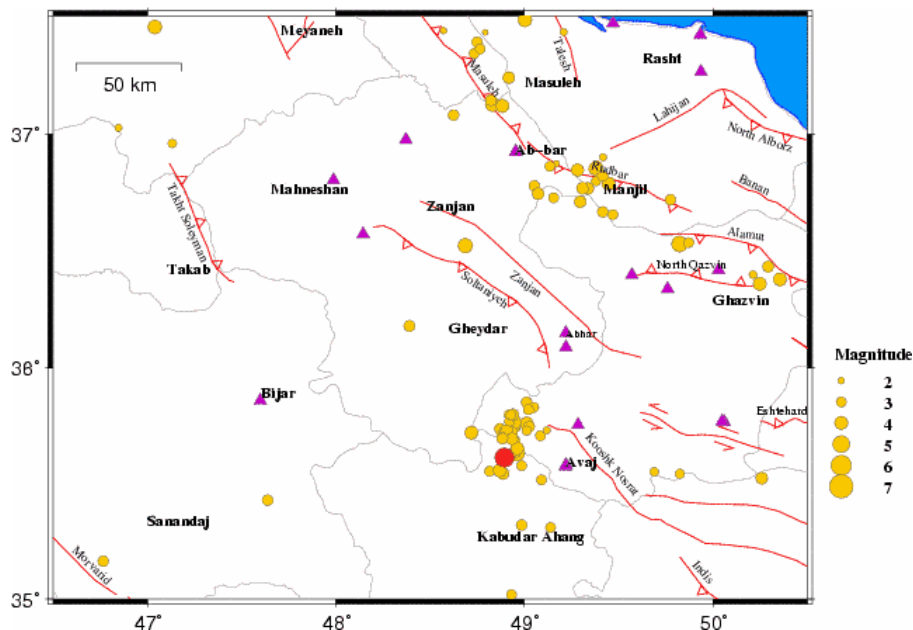
برخلاف لرزه‌نگارهای شبکه‌های لرزه‌نگاری ایران، داده‌های ثبت شده با شتاب‌نگارهای سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن، به‌صورت محلی روی دستگاه شتاب‌نگار ثبت می‌شود و بعد از مدت نسبتاً طولانی با مودم برداشت و در مرکز شبکه ذخیره می‌شود. لرزه‌نگارهای شبکه‌های وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک به‌صورت برخط و پیوسته صرف‌نظر از اینکه زلزله اتفاق افتاده یا نه داده‌های ثبت شده را به مرکز شبکه ارسال می‌کنند (قدس و ثبوتی، ۲۰۰۵). ارسال مداوم و برخط داده‌ها به مرکز یک شبکه، امتیاز بسیار خوبی برای شبکه است، زیرا به اپراتورهای شبکه اجازه تشخیص سریع وقوع زلزله و منتسب کردن (associate) آسان ثبت‌های شکل موج یک رویداد به یک زلزله خاص را می‌دهد. بنابراین به علت برخط نبودن (off line) شبکه شتاب‌نگاری،

ثبت کرده است. عسکری و قدس (۱۳۸۶) با استفاده از کاتالوگ زلزله منطقه تحقیق که از تلفیق همه داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری تهیه شده، نشان دادند، که آستانه کامل بودن داده‌های ثبت شده در منطقه مورد بررسی همواره کوچک‌تر از ۳۵ است. بنابراین می‌توان ادعا کرد که کاتالوگ زلزله‌های مورد استفاده در این تحقیق در بدترین وضعیت باید برای زلزله‌های بالاتر از ۳۵ کامل باشد و یا به عبارتی در برگیرنده همه زلزله‌های بالاتر از ۳۵ باشد.

با توجه به فرض بالا، زلزله‌هایی که هر دو شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری ثبت کرده‌اند را پیدا کردیم. کل موارد ثبت شده در محدوده زمانی ۱۹۹۶-۲۰۰۶، ۱۰۲۳ ثبت است. بررسی‌های اولیه روشن ساخت که ثبت‌های پیش‌گفته مربوط به ۱۶۴ رویداد زلزله هستند. در مرحله اول تلفیق، به جای اطلاعات مکانی زلزله از زمان وقوع زلزله‌ها برای تلفیق استفاده شد. زمان وقوع زلزله را عملگرهای شبکه شتاب‌نگاری وارد ثبت‌ها کردند و این تنها مشخصه زمانی است که در این ثبت‌ها وجود دارد. فرض ما برای تلفیق زلزله‌ها در دو بانک این است که زمان وقوع زلزله‌ها باید کمتر از یک دقیقه با هم تفاوت داشته باشد. پس در قدم اول اگر دو زلزله در دو بانک مورد نظر دارای تفاوت زمانی کمتر از یک دقیقه باشند آنها را یک زلزله فرض می‌کنیم. در مرحله بعد با وارد کردن زمان رسید شتاب‌نگارها در مکان‌یابی، صحت یکی بودن دو داده مستقل را ارزیابی می‌کنیم. اگر اکثر زمان رسیدهای مربوط به شتاب‌نگارها دارای خطای زیادی باشند و مکان‌یابی زلزله را بدتر کنند، دو زلزله در دو بانک حتی با داشتن زمان وقوع نزدیک به هم یکی در نظر گرفته نمی‌شوند. در مواردی که از یک زلزله فقط یک یا چند ثبت غیرخوآنا و غیر قابل استفاده در مکان‌یابی داریم، در صورتی که رومرکز زلزله در نزدیکی (کمتر از ۲۰ کیلومتری) ایستگاه‌های شتاب‌نگار باشد، داده‌های دو

شبکه زلزله‌نگاری و شتاب‌نگاری را مربوط به یک زلزله در نظر می‌گیریم. از آنجا که زمان ثبت شده برای شتاب‌نگارها صحیح نیست، ما از تفاوت زمان رسید موج S از موج P که در نرم‌افزار HYPOCENTER 3.2 (لینرت، ۱۹۹۴) تعبیه شده است، در مکان‌یابی استفاده کردیم (برای توضیحات بیشتر به ضمیمه رجوع شود). در این روش مکان‌یابی وزن‌دهی فازها برحسب فاصله صورت می‌گیرد (هر چه فاصله بیشتر باشد، وزن فاز کمتر است). نقش زمان رسید S-P در تعیین رومرکز زلزله به اندازه دیگر فازهای خوانده شده روی زلزله‌نگارها است و نقش زمان رسید S-P در تعیین عمق زلزله همواره بیشتر از دیگر فازها در منطقه تحقیق است، چون همواره شتاب‌نگارها به کانون زلزله نزدیک‌تر هستند.

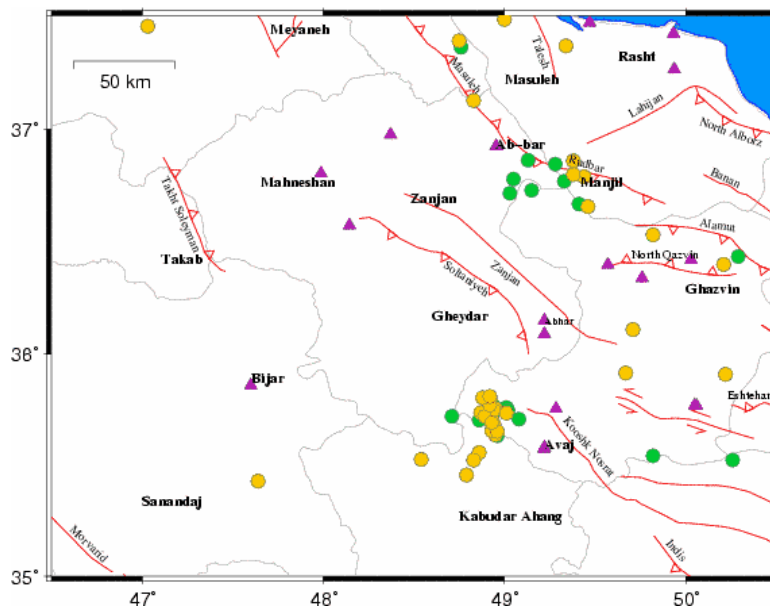
تلفیق داده‌های شبکه‌های شتاب‌نگاری و لرزه‌نگاری به‌طور قابل توجهی تعداد ثبت‌های شتاب‌نگاری را که به زلزله‌های خاصی منتسب شده‌اند، افزایش داد. از میان ۱۶۴ زلزله ثبت شده با شبکه شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن، فقط برای ۵۷ رویداد اطلاعات رومرکز زلزله داده شده که از این تعداد فقط ۱۸ رویداد دارای بزرگا هستند. در طی فرایند تلفیق داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری موفق شدیم تعداد زلزله‌های منتسب شده‌ای که با شتاب‌نگارها حس شده‌اند، به ۷۶ عدد افزایش دهیم (شکل ۳)، دقت تعیین رومرکزشان را افزایش دهیم و بزرگایی محلی برای آنها محاسبه کنیم. ۴۰۳ ثبت مورد استفاده در مکان‌یابی مجدد زلزله‌ها مربوط به ۴۷ ایستگاه هستند که در شکل ۳ به‌صورت مثلث‌های بنفش رنگ نشان داده شده‌اند. روی نقشه به جای ۴۷ ایستگاه تنها می‌توان ۱۷ ایستگاه مشاهده کرد. این بدین دلیل است که ۶ ایستگاه خارج از منطقه تحقیق قرار می‌گیرند و ۲۴ ایستگاه دارای مختصات بسیار نزدیک به هم هستند که با اندکی جابه‌جایی مکانی، نام متفاوتی گرفته‌اند.



شکل ۳. رومرکز ۷۶ زلزله‌ای که شبکه شتاب‌نگاری توانسته است از ۳۰۴ زلزله‌ای ثبت شده در منطقه مورد بررسی را ثبت نماید. مثلث‌ها، موقعیت ایستگاه‌های شتاب‌نگاری که در مکان‌یابی ۷۶ زلزله نشان داده شده در نقشه بالا شرکت داشته‌اند را نشان می‌دهد.

۴ تأثیر داده‌های شتاب‌نگاری بر بهبود مکان‌یابی
به‌منظور ارزیابی دقیق اثر تلفیق داده‌های شتاب‌نگاری روی مکان‌یابی زلزله‌های منطقه تحقیق، مقدار کاهش گاف آزیموتی ایستگاه‌های ثبت کننده در اثر افزودن ایستگاه‌های شتاب‌نگاری محاسبه شد. گاف آزیموتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده کیفیت مکان‌یابی زلزله است و هدف اصلی ما در تلفیق داده‌های شتاب‌نگاری با داده‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری، بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها از راه کاهش گاف آزیموتی است. به این منظور، تعداد ۴۰۳ ثبت (هر ایستگاه سه ثبت) برای ۷۶ زلزله‌ای که هر دو شبکه لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری ثبت کرده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳ رومرکز زلزله‌هایی که هر دو شبکه ثبت کرده‌اند را نشان می‌دهد. بررسی‌های ما نشان داد که افزودن داده‌های شتاب‌نگاری به داده‌های گردآوری شده از شبکه‌های لرزه‌نگاری، مکان‌یابی ۳ زلزله که قبلاً به علت کمبود داده عملی نبود

را ممکن ساخت. برای چهار زلزله گاف آزیموتی را بین ۶۰ تا ۹۰ درجه کاهش داد، برای ۱۱ زلزله گاف آزیموتی را بین ۳۰ الی ۶۰ درجه کاهش داد، برای ۲۱ زلزله گاف آزیموتی را بین ۱ الی ۳۰ درجه کاهش داد و برای ۳۷ زلزله هیچ تاثیری نداشت. این آمار در جمع بیانگر اثر کم داده‌های شتاب‌نگاری در بهبود مکان‌یابی زلزله‌های منطقه مورد تحقیق است (شکل ۴).
با توجه به پراکندگی بسیار خوب شتاب‌نگارها در سطح منطقه مورد تحقیق، اثر کم داده‌های شتاب‌نگاری معماگونه است. این معما را می‌توان بدین ترتیب توضیح داد که اکثر گسل‌های مسبب زلزله در منطقه دارای راستای تقریباً شرقی- غربی هستند (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲). متاسفانه آرایش شبکه‌های زلزله‌شناسی طوری است که بیشترین پوشش را در راستای تقریباً شرقی- غربی مهیا می‌کند. شبکه‌های تهران و تبریز بیشترین نقش را در تعیین محل زلزله‌های این منطقه، به‌خصوص در طی



شکل ۴. رومرکز زلزله‌هایی که با شبکه شتاب‌نگاری ثبت شده‌اند. دایره‌های سبز و زرد به ترتیب رومرکز زلزله‌هایی که به اندازه کمتر و بیشتر از ۳۰ درجه، گاف لرزه‌ای آنها در اثر اضافه شدن داده‌های شتاب‌نگاری بهبود یافته را نشان می‌دهند.

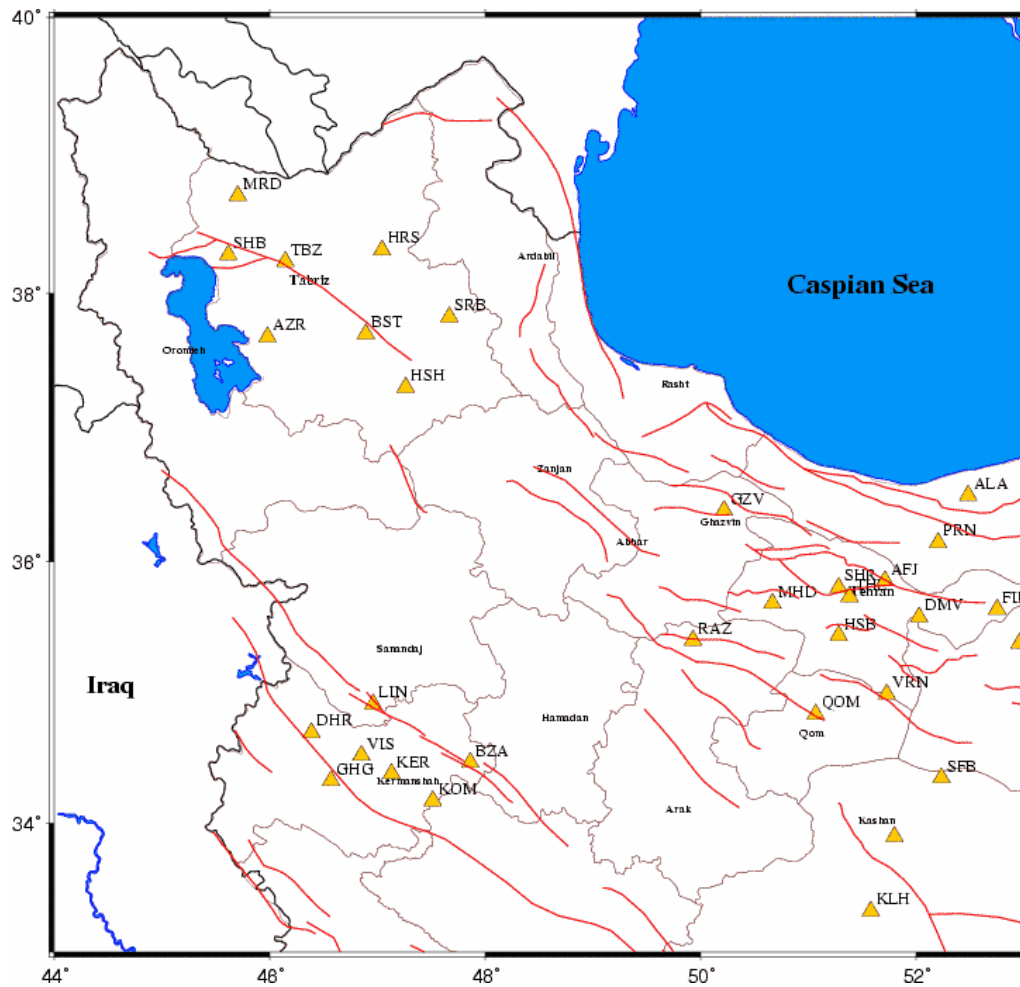
مشابه با ایستگاه شتاب‌نگار هستند کاهش داده یا حذف شود تا اثر مثبت اضافه کردن زمان رسیدگی به دست آمده از شتاب‌نگارها به خوبی خود را نشان دهد. چنین کاری در تحقیق حاضر صورت پذیرفته است.

۵ ارزیابی عملکرد سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن در ثبت داده‌ها

برای ارزیابی کمی عملکرد شبکه شتاب‌نگاری، تعداد کل ایستگاه‌های منطقه مورد تحقیق را که دارای حداقل یک ثبت لرزه‌ای هستند پیدا کردیم. از تعداد کل ۱۲۹ شتاب‌نگار ۱۱۷ شتاب‌نگار دارای ثبت لرزه‌ای در طی سال‌های ۱۹۹۵ الی ۲۰۰۶ هستند. فقط ۱۲ شتاب‌نگار فاقد ثبت‌اند (مثلث‌های سبز در شکل ۱) که بیشتر در قسمت جنوب غربی منطقه مطالعاتی جایی که لرزه‌خیزی در ده سال اخیر کمتر بوده متمرکز هستند. تعدادی از ایستگاه‌های فاقد ثبت در درون مناطق لرزه‌خیز و در

سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۴ داشته‌اند. شبکه تهران در شرق و شبکه تبریز در شمال غرب منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است (شکل ۵). تنها در مواردی که یکی از شبکه‌های اصلی تهران و یا تبریز فاقد داده هستند، داده‌های شبکه شتاب‌نگاری توانسته به‌طور مؤثری میزان گاف لرزه‌ای را کاهش دهد. همچنین در مواردی که امتداد گسل‌ها از امتداد کلی منحرف شده (به مانند گسل ماسوله)، تعداد زلزله‌هایی که گاف آزمون‌شان به‌طور قابل ملاحظه‌تری بهبود یافته، بیشتر شده است.

هر چند اضافه کردن داده‌های شتاب‌نگاری نتوانست گاف لرزه‌ای را بهبود ببخشد، ولی به علت اینکه ایستگاه‌های شتاب‌نگاری در فاصله چند ده کیلومتری و گاهی چند کیلومتری رومرکز قرار گرفته‌اند، داده‌های زمان رسید شتاب‌نگارها ممکن است به‌طور قابل ملاحظه‌ای خطای مکان‌یابی را کاهش دهد. برای این منظور، باید نقش ایستگاه‌های دور که دارای آزمون



شکل ۵. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (مثلث‌های زرد). اثر سطحی گسل‌های فعال به صورت منحنی‌های سرخ رنگ نشان داده شده است (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲).

می‌زیم که فقط ۱۰۳ شتاب‌نگار در حال حاضر در منطقه مورد تحقیق مشغول کار هستند.

پراکندگی رومرکز زلزله‌هایی که منجر به ایجاد ثبت‌های شتاب‌نگاری شده‌اند (شکل ۳) همخوانی خوبی با تصویر کلی زلزله‌خیزی در منطقه (شکل ۲) دارد که خود می‌تواند تأییدی بر پراکندگی خوب ایستگاه‌های شتاب‌نگار و عملکرد تقریباً یکنواخت آنها در زمان باشد. در صورتی که تعداد ایستگاه‌ها در یک منطقه لرزه‌خیز کم باشد یا عملکرد آنها در زمان بسیار نامطلوب باشد، تصویر به‌دست آمده از لرزه‌خیزی با استفاده از شبکه‌های

مجاورت ایستگاه‌هایی که دارای ثبت هستند قرار دارند. این ایستگاه‌ها احتمالاً در سال‌های اخیر نصب شده‌اند. به علت اینکه سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن سال آغاز به کار و شرایط کنونی (مشغول به کار بودن ایستگاه یا تعطیلی) ایستگاه را اعلام نمی‌کند، نتوانستیم احتمال پیش‌گفته را مورد تأیید قرار دهیم. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که تعداد قابل توجهی از آنها بسیار نزدیک به هم هستند. این احتمالاً نشان از جابه‌جا شدن ایستگاه به یک منطقه در مجاورت محل قبلی دارد. با استفاده از شرط نزدیک بودن ایستگاه‌ها به هم، حدس

فاصله ایستگاه‌های دارای ثبت را در مقابل بزرگای زلزله نشان می‌دهد. با استفاده از شکل ۷، رابطه‌ای محتاطانه را به صورت زیر تعریف می‌کنیم،

$$d = 10^{\log 5 + 0.31(\text{mag} - 2)} \quad (1)$$

که در آن d فاصله (به کیلومتر) دورترین دستگاه شتاب‌نگاری دارای ثبت لرزه‌ای از رومرکز زلزله‌ای با بزرگای mag است. در رابطه بالا به جای عرض از مبدأ ۱۵، عرض از مبدأ ۵ کیلومتر استفاده شده است. علت انتخاب رابطه محتاطانه برای فاصله تحریک دستگاه با بزرگا، ارتباط با خطای قابل ملاحظه در عمق کانون زلزله است. علاوه بر این بزرگ‌ترین دامنه امواج دریافتی در یک ایستگاه وابستگی شدیدی به الگوی تابش گسل و مقدار میرایی مسیر دارد. مقدار میرایی مسیر خود وابسته به زمین‌شناسی محلی و خواص سنگ بستر ایستگاه است. با استفاده از رابطه بالا، زلزله‌ها و ایستگاه‌های شتاب‌نگاری را که باید ثبت می‌داشتند ولی ندارند، حدس زدیم. با فرض اینکه همه ایستگاه‌های شتاب‌نگاری در طی سال‌های ۱۹۹۶-۲۰۰۶ در حال کار کردن بوده باشند، ۷۵ زلزله به جز ۷۶ زلزله‌ای که دارای ثبت هستند (شکل ۳) باید حداقل با یک شتاب‌نگار ثبت می‌شدند. علت فقدان داده برای بسیاری از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مظنون، فقط به مؤخر بودن زمان احداث ایستگاه‌های مظنون نسبت به زمان وقوع زلزله‌ها است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های شتاب‌نگاری زمان شروع و پایان کار یک ایستگاه شتاب‌نگاری را در اختیار ما قرار نمی‌دهد. در صورتی که یک ایستگاه همواره تا تاریخی خاص فقدان داده داشته باشد، علت فقدان داده را مربوط به مؤخر بودن زمان احداث ایستگاه نسبت به وقوع زلزله می‌دانیم. با وارد کردن قید بالا متوجه شدیم که ایستگاه‌های شتاب‌نگاری *Dezaj* (35.05, 47.95)، Soltan Abad (37.08, 47.93) هیچ کدام ثبتی ندارند و لاجرم این ایستگاه‌ها باید اخیراً تأسیس شده باشند. با

شتاب‌نگاری و لرزه‌نگاری باید کاملاً تفاوت کند و هم همخوانی نداشته باشد.

برای تعیین آستانه کامل بودن داده‌های ثبت شده با شبکه شتاب‌نگاری، تعداد ایستگاه‌های شتاب‌نگاری که یک زلزله را ثبت کرده‌اند برحسب بزرگای زلزله‌های ثبت شده رسم شد (شکل ۶). اکثر زلزله‌های کوچک‌تر از بزرگای ۴ یا بدون ثبت لرزه‌ای‌اند یا فقط یک یا دو ایستگاه شتاب‌نگار آنها را ثبت کرده‌اند. براساس شکل ۶، درجه کامل بودن شبکه از نظر بزرگای زلزله در حدود ۴ است و یا به عبارتی شبکه شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن در محدوده مورد بررسی تقریباً برای همه زلزله‌های بیشتر از بزرگای ۴، توانایی تولید ثبت شتاب‌نگاری را دارد.

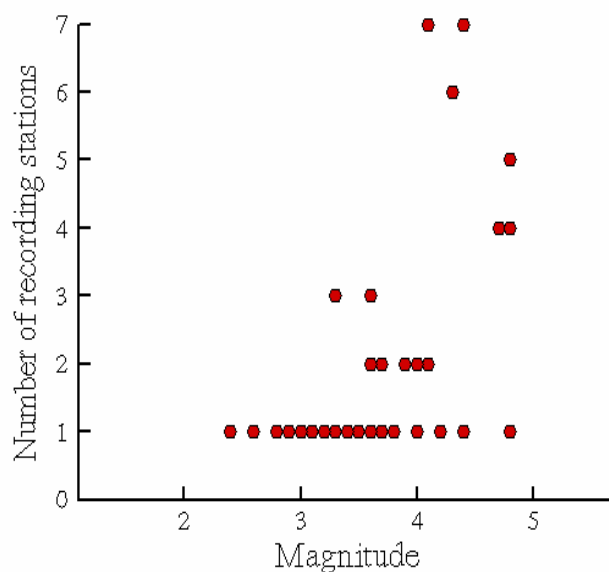
سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن دستگاه‌های شتاب‌نگار را طوری تنظیم می‌کند که هر گاه شتاب بیشتر از $0.1g$ شود، دستگاه لرزه را ثبت می‌کند. رسم فاصله ایستگاه‌هایی که دارای ثبت لرزه‌ای هستند برحسب بزرگای آنها می‌تواند آزمون خوبی برای یکنواخت بودن تنظیم دستگاه‌ها باشد. شکل ۷ به خوبی نشان می‌دهد که به جز موارد اندکی، لگاریتم فاصله دورترین ایستگاه ثبت کننده به صورت خطی با افزایش بزرگا و با شیب تقریبی 0.31 زیاد می‌شود. این مشاهده تأییدی بر یکنواخت بودن آستانه چکانش (trigger) دستگاه‌های شتاب‌نگار است. افزایش خطی لگاریتم فاصله با افزایش بزرگا نشانگر این است که بزرگ‌ترین دامنه ثبت شده روی شتاب‌نگارها مربوط به امواج حجمی حوضه نزدیک است (آکی و ریچارد، ۱۹۸۰).

در قدم بعدی می‌خواهیم ببینیم آیا زلزله‌ای اتفاق افتاده که تعدادی از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری شبکه قابلیت ثبت آن را داشته ولی موردی برای آن ثبت نکرده‌اند؟ برای جواب دادن به این سؤال رابطه فاصله تحریک دستگاه با بزرگا را به‌طور تجربی تعریف کردیم. شکل ۷

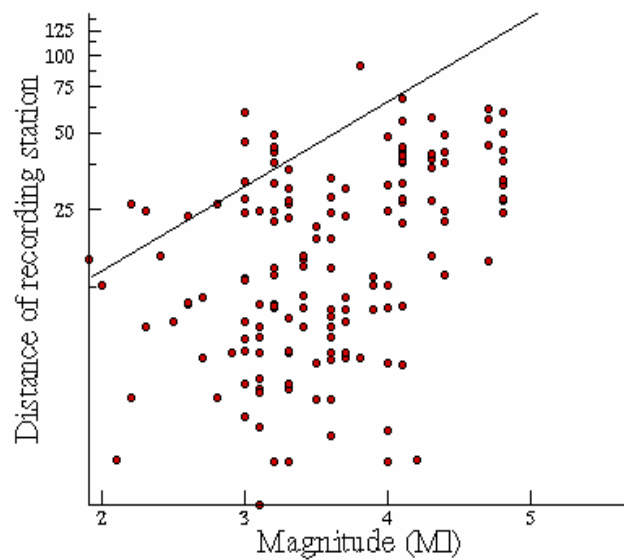
مکان‌یابی زلزله‌ها شرکت داده شدند، روشن ساخت که هیچ کدام از ثبت‌ها اشباع و یا برچیده (clipped) نشده بودند. این در نگاه اول می‌تواند نکته مثبتی باشد ولی بررسی‌های دقیق‌تر مشخص کرد که داده‌های شکل موج دارای قدرت تفکیک (resolution) کافی در دامنه نیستند (شکل ۸). این به آن دلیل است که داده‌های دستگاه‌های شتاب‌نگار سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن با رقمی‌سازی ۱۲ بیتی رقمی شده‌اند و دارای محدوده دینامیکی ۷۲db هستند که محدوده نسبتاً کوچکی است. نبود دقت کافی در دامنه، به خصوص وقتی که زمان رسیده‌ها به صورت آرام (emergent) باشند باعث نبود دقت در خواندن زمان رسیده‌های امواج لرزه‌ای می‌شود. دقت خواندن زمان رسیده‌ها در حدود ۰٫۲ الی ۰٫۴ ثانیه است. برای بهبود دقت خواندن زمان رسیده‌ها پیشنهاد می‌شود که دستگاه‌های شتاب‌نگار مجهز به رقمی‌سازهای ۱۶ یا ۲۴ بیتی همراه با تجهیزات GPS شوند. ارتقای رقمی‌سازهای استفاده شده در شتاب‌نگارها، کاربرد آنها را در بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها و دیگر شاخه‌های دانش زلزله‌شناسی بیشتر می‌کند.

حذف ایستگاه‌های بالا فقط ۱۲ زلزله به‌جز زلزله‌های ثبت شده باید حداقل با یک شتاب‌نگار ثبت شده باشند. در جمع تعداد ایستگاه‌هایی که بر طبق رابطه فاصله تحریک دستگاه با بزرگای باید ثبت می‌داشتند، محدود و غیر قابل ملاحظه است. این مشاهده می‌تواند دلیل بسیار مثبتی بر عملکرد خوب شبکه شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن در نگهداری، استخراج و بایگانی کردن صحیح داده‌های شتاب‌نگاری باشد. همچنین فقدان زیاد ثبت‌های شتاب‌نگاری برای دو ایستگاه تازه تاسیس می‌تواند نشانه‌ای بر موقعیت حساس این ایستگاه‌ها در ثبت زلزله‌خیزی منطقه باشد. اگر وضعیت زلزله‌خیزی منطقه در آینده مشابه وضعیت لرزه‌خیزی در ۱۰ سال قبل باشد، براساس آمار تعداد کل زلزله‌های تشخیص داده شده با شبکه شتاب‌نگاری به تعداد زلزله‌های ثبت شده با شبکه‌های لرزه‌شناسی، می‌توان پیش‌بینی کرد که شبکه با تعداد کنونی ایستگاه‌ها، برای ۴۹٪ از زلزله‌های با بزرگای بالای ۳ ثبت شتاب‌نگاری خواهد داشت.

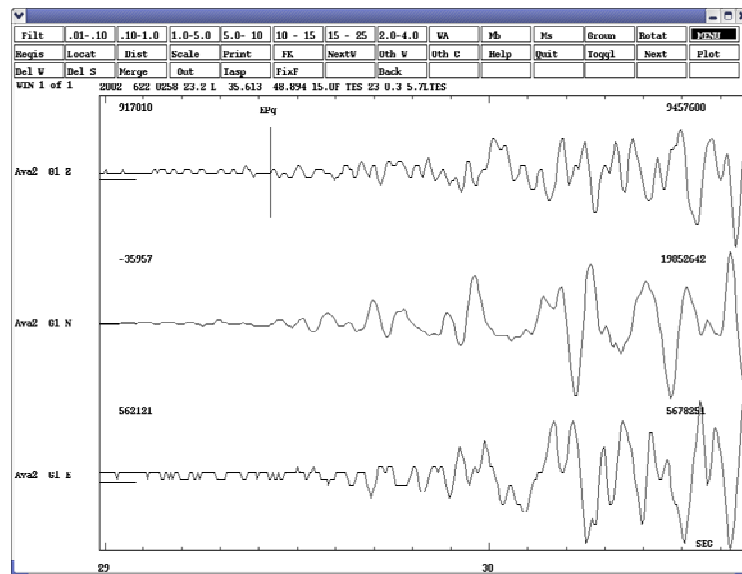
بررسی داده‌های شکل موج ۴۰۹ ثبتی که در



شکل ۶. تعداد ایستگاه‌های شتاب‌نگاری که یک زلزله را ثبت کرده‌اند (محور عمودی) در مقابل بزرگای زلزله (محور افقی).



شکل ۷. فاصله از رومرکز ایستگاه‌های شتاب‌نگاری دارای ثبت لرزه‌ای (محور عمودی) در مقابل بزرگای محلی زلزله مسبب (محور افقی).



شکل ۸. شکل موج‌های شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله چنگوره آوج که در تاریخ 2002/06/22 رویداده است. شکل موج‌ها را ایستگاه آوج ثبت کرده است. شکل نبود قدرت تفکیک نگاشت برای خواندن اولین رسید موج P را به وضوح نشان می‌دهد.

از ۳۰۴ زلزله کاتالوگ تهیه شده از شبکه‌های لرزه‌نگاری ثبت شتاب‌نگار پیدا کنیم. نتایج این تحقیق روشن ساخت که شبکه شتاب‌نگاری در منطقه مورد بررسی دارای پتانسیل نسبتاً ضعیفی برای بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها است.

۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق روشن ساختیم که آستانه کامل بودن داده‌های شبکه شتاب‌نگاری سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن در حدود بزرگای ۴ است و توانستیم برای ۷۶ زلزله

شبکه و استخراج و نگهداری داده‌ها در سطح قابل قبولی است. با این حال اشکالات مهمی در نحوه عرضه داده‌های رقومی مشاهده شد، که در این خصوص می‌توان به این موارد اشاره کرد: (۱) فایل‌های رقومی دارای فرمت‌های متفاوتی هستند (۲) فایل‌های رقومی براساس رویداد و سال ذخیره نمی‌شوند (۳) فایل‌های رقومی در برگیرنده اطلاعاتی نظیر نام خلاصه ایستگاه، مرجع استفاده شده برای تعیین بزرگا و رومرکز زلزله نیستند (۴) نام مختصر ایستگاه‌ها از نظر تعداد حروف بین یک الی هشت حرف متغیر است. در استانداردهای جهانی نام طول نام مختصر ایستگاه ثابت و معمولاً بیشتر از ۵ حرف نیست. علاوه بر مشکلات بالا که مربوط به فایل‌های رقومی است، اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های شتاب‌نگارها، فاقد موارد مهمی نظیر تاریخ شروع به کار ایستگاه و وضعیت کنونی آن است.

تشکر و قدردانی

نگارندان از سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن و مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای در اختیار گذاشتن داده‌های مورد استفاده در این تحقیق کمال تشکر را دارند. همچنین نگارندگان از آقای مهندس میرزایی علویجه به خاطر ارایه اطلاعاتی در مورد نحوه کارکرد شبکه شتاب‌نگاری ایران بسیار سپاسگزارند.

منابع

حسامی، خ.، جمالی، ف.، و طبسی، ه.، ۱۳۸۲، نقشه گسل‌های فعال ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.
عسکری، ر.، و قدس، ع.، ۱۳۸۶، لرزه‌خیزی فعال در منطقه زنجان، ارسال شده به مجله علوم زمین.

Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology: theory and methods, W. H. Freeman, San Francisco. USA.

این بدان دلیل است که اکثر گسل‌های منطقه در راستای بیشترین پوشش آزمون‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه شبکه شتاب‌نگاری دارای تراکم فضایی مشابهی در دیگر مناطق کشور است، انتظار می‌رود هر گاه راستای گسل‌های یک منطقه در جهتی غیر از راستای بیشترین پوشش آزمون‌های شبکه‌های لرزه‌نگاری باشد، داده‌های شبکه شتاب‌نگاری بتواند مکان‌یابی زلزله‌های بالای بزرگای ۴ را به طرز قابل توجهی بهبود بخشد.

فقط ۳۹٪ از کل ثبت‌های شتاب‌نگاری در بهبود مکان‌یابی شرکت داشتند. بقیه ثبت‌ها یا مربوط به زلزله‌های بزرگ خارج از منطقه و یا مربوط به زلزله‌های کوچکی بودند که دارای زمان وقوع دقیقی نیستند و قابلیت منتسب شدن به زلزله‌ای را ندارند. استفاده از دستگاه GPS برای زمان دهی دقیق به ثبت‌های شتاب‌نگاری مشکل منتسب کردن ثبت‌های شتاب‌نگاری را کاملاً حل خواهد کرد و اهمیت شبکه شتاب‌نگاری در بهبود مکان‌یابی زلزله‌ها را به مراتب بیشتر خواهد ساخت.

از ۴۰۳ ثبت مورد استفاده در بهبود مکان‌یابی، فقط ۱۹۵ رکورد مربوط به زلزله‌های بزرگ‌تر از بزرگای ۴ است. این آمار نشانگر آن است که در بعضی از مناطق به خصوص در اطراف گسل‌های منجیل و قزوین و منطقه آوج، شبکه حساسیت لازم برای ثبت زلزله‌های کوچک‌تر را داشته است (شکل ۳). با استفاده از این مشاهده پیشنهاد می‌شود تراکم شبکه را در اطراف گسل‌های مهم منطقه زیاد شود تا آستانه کامل بودن شبکه کاهش یابد. با این تمهید می‌توان کارایی شبکه شتاب‌نگاری در بهبود نقشه‌های لرزه‌خیزی را بیشتر کرد.

با به دست آوردن رابطه‌ای تجربی ساده بین بزرگای زلزله و دورترین فاصله تحریک دستگاه شتاب‌نگار، روشن شد که عملکرد شبکه در نگهداری دستگاه‌های

- Bormann, P., 2002, New Manual of Seismological Observatory Practice, IASPEI, GeoForschungsZentrum Potsdam, Vol: 1.
- Ghods, A., and Sobouti, F., 2005, Quality assessment of seismic recording: Tehran seismic telemetry network: Asian J. Earth Sci., **25**, 687-694.
- Havskov, J., and Ottemöller, L., 2003, SEISAN: THE EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE, Department of Earth Science, University of Bergen, Norway.
- Hutton, L. K., and Boore, D. M., 1987, The ML scale in Southern California: B. Seismol. Soc. Am., **77**, 2074-2094.
- Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, Modern global seismology, 521 pp., Academic Press, USA.
- Lienert, R. B., 1994, A computer program for locating earthquakes locally, regionally and globally, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology.
- Shearer, P. M., 1999, Introduction to seismology, 260 pp., Cambridge University Press, England.

ضمیمه

زمان رسید فازی خاص به یک ایستگاه، تابع غیر خطی از m است وقتی که m مختصات (x,y,z) و زمان وقوع زلزله (t_0) است. در ساده‌ترین حالت که مدل زمین ما متشکل از لایه‌ای همگن است رابطه بین زمان رسید در ایستگاه i (t_c^i) با m را می‌توان به صورت زیر نوشت. استفاده این مدل ساده برای فازهای خوانده شده روی شتاب‌نگارها تا حد زیادی صحیح است، چون به علت نزدیکی شتاب‌نگار به کانون زلزله، پرتویی که به آنها می‌رسد فقط از لایه سطحی عبور کرده است و همچنین، اکثر زلزله‌های منطقه دارای عمق کمی هستند.

$$t_c^i = f(m) = t_0 + \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}{v} \quad (1)$$

وقتی که x_0, y_0, z_0 مختصات ایستگاه i است. حال می‌توان تابع f را حول یک مقدار اولیه m_0 به صورت زیر بسط تیلور داد.

$$t_c^i = t_c^i(m_0) + \frac{\partial t_c^i(m_0)}{\partial m_j} \Delta m_j \quad (2)$$

وقتی که محدوده Δm_j از یک تا چهار است و در ارتباط با چهار مجهول مختصات و زمان وقوع زلزله است. حال با کم کردن زمان رسید مشاهده شده برای یک فاز در ایستگاه i (t_0^i) داریم.

$$t_0^i - t_c^i = t_0^i - t_c^i(m_0) - \frac{\partial t_c^i(m_0)}{\partial m_j} \Delta m_j \quad (3)$$

ما به دنبال یک m_0 هستیم که سمت چپ رابطه بالا را صفر کند پس داریم.

$$t_0^i - t_c^i(m_0) = \frac{\partial t_c^i(m_0)}{\partial m_j} \Delta m_j \quad (4)$$

برای حل معادله بالا اول باید با استفاده از معادله (۱) مقادیر $\frac{\partial t_c^i(m_0)}{\partial m_j}$ را برای هر فاز و هر ایستگاه به دست آوریم. اگر رابطه

بالا را برای فازهای S, P و $S-P$ بنویسیم داریم،

$$\begin{pmatrix} t_{op}^1 - t_{cp}^1 \\ t_{op}^2 - t_{cp}^2 \\ \dots \\ t_{os}^1 - t_{cs}^1 \\ t_{os}^2 - t_{cs}^2 \\ \dots \\ t_{os}^1 - t_{op}^1 - (t_{cs}^1 - t_{cp}^1) \\ t_{os}^2 - t_{op}^2 - (t_{cs}^2 - t_{cp}^2) \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_{cp}^1(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{cp}^1(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{cp}^1(m_0)}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_{cp}^2(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{cp}^2(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{cp}^2(m_0)}{\partial z} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_{cs}^1(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{cs}^1(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{cs}^1(m_0)}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_{cs}^2(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{cs}^2(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{cs}^2(m_0)}{\partial z} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_{c(S-P)}^1(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{c(S-P)}^1(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{c(S-P)}^1(m_0)}{\partial z} & 0 \\ \frac{\partial t_{c(S-P)}^2(m_0)}{\partial x} & \frac{\partial t_{c(S-P)}^2(m_0)}{\partial y} & \frac{\partial t_{c(S-P)}^2(m_0)}{\partial z} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با توجه به معادلات بالا اگر فقط از فازهای نسبی S-P استفاده کنیم، نمی‌توانیم زمان وقوع زلزله را پیدا کنیم. حال با حل معادله بالا می‌توانیم مقادیر Δm را به دست آوریم و مقدار m_0 را بهبود ببخشیم. معادله بالا به صورت تکراری حل می‌شود تا وقتی که اندازه نرم Δm از یک حد تعیین شده کمتر شود. حال بعد از این مقدمات که اساساً شرح روش گایگر است، می‌خواهیم نشان دهیم که ضرایب ماتریس مشتقات جزئی برای S-P در فواصل کم، همواره به اندازه دیگر فازها است و یا به عبارتی، تأثیر آن در مکان‌یابی حداقل به اندازه دیگر فازها است. در زیر مقدار $\frac{\partial t_{c(S-P)}^2(m_0)}{\partial X}$ را با استفاده از معادله یک به دست می‌آوریم.

$$\frac{\partial t_{c(S-P)}^2(m_0)}{\partial X} = \frac{(X - X_0)}{R^{1/2}} \left(\frac{V_P - V_S}{V_P V_S} \right) \quad (6)$$

وقتی که V_P و V_S به ترتیب سرعت موج S و P هستند و R فاصله ایستگاه تا کانون زلزله است. مقدار $\left(\frac{V_P - V_S}{V_P V_S} \right)$ از مقادیر مربوطه برای مشتق زمان رسید فازهای P و S، $\left(\frac{1}{V_S} \right)$ و $\left(\frac{1}{V_P} \right)$ ، کمتر است. اگر سرعت موج P و S را به ترتیب ۶ و ۳٫۷۵ کیلومتر بر ثانیه بگیریم مقادیر $\left(\frac{V_P - V_S}{V_P V_S} \right)$ ، $\left(\frac{1}{V_P} \right)$ و $\left(\frac{1}{V_S} \right)$ به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۱۱، ۰/۱۵ و ۰/۲۶ هستند. از طرف دیگر مقدار $\frac{(X - X_0)}{R^{1/2}}$ با فاصله همواره زیاد می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که فازهای نسبی S-P خوانده شده روی شتاب‌نگارها تأثیر بسیار کمتری در تعیین رومرکز زلزله نسبت به فازهای خوانده شده از ایستگاه‌های دورتر دارند. از آنجا که فازهای نزدیک همواره دارای خطای کمتری نسبت به مدل فرضی زمین هستند، باید کاری کنیم که دارای نقش مهم‌تری در فرایند معکوس‌سازی برای تعیین زمان و رومرکز زلزله شوند. برای دستیابی به این هدف، نرم‌افزار Hypocenter که در مقاله ما برای مکان‌یابی زلزله‌ها به کار رفته شده است به‌طور خطی با فاصله وزن فازهای خوانده شده برای ایستگاه‌های دور را کم می‌کند.

$$W_d = \frac{X_{far} - \Delta}{X_{far} - X_{near}} \quad (7)$$

که در رابطه فوق، W_d وزن یک فاز در فاصله Δ ، X_{far} و X_{near} به ترتیب میزان بیشینه و کمینه فاصله‌ها از کانون زمین‌لرزه هستند که در این فواصل می‌توان برای مکان‌یابی، فاز خواند. پس در برنامه به کار رفته نقش فازهای S-P در مکان‌یابی رومرکز زلزله در فواصل نزدیک، بیشتر از فازهای فواصل دور است. مقادیر مشتقات جزئی زمان رسید برحسب عمق برای S-P همواره بزرگ‌تر از سایر فازهایی است که ایستگاه‌های ثبت‌کننده آنها به‌طور قابل توجهی دورتر از کانون زمین‌لرزه هستند، این همان حالتی است که همیشه در منطقه مورد تحقیق اتفاق افتاده است. پس در منطقه مورد تحقیق به علت دوری ایستگاه‌های لرزه‌نگاری، نقش فازهای S-P شتاب‌نگارها در تعیین عمق زلزله‌ها همواره بیشتر از سایر فازهای خوانده شده از روی زلزله‌نگارها است.