

ارزیابی مکان‌یابی زمین‌لرزه در دو شبکه لرزه‌نگاری محلی و منطقه‌ای در البرز مرکزی

امین عباسی*

دکترای تخصصی ژئوفیزیک - زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۵/۶/۶، پذیرش نهایی: ۹۵/۱۱/۵)

چکیده

مکان‌یابی قابل اعتماد زمین‌لرزه یکی از مهم‌ترین معیارها در بررسی لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساختی و تحلیل خطر لرزه‌ای است؛ در این بین، تعیین ژرفای رویدادها، چالش‌برانگیزتر و البته مهم است. در این مطالعه، لرزه‌های ثبت‌شده همزمان توسط شبکه محلی موقت لبه جنوبی البرز مرکزی در سال ۲۰۰۶ و شبکه منطقه‌ای لرزه‌نگاری تهران، ارزیابی شده‌اند. برای این کار، رویدادهای ثبت‌شده در هر دو شبکه، بدون تصحیح زمانی در فایل گزارش داده‌ها (S-files)، در نرم‌افزار سایزن (SEISAN) و با کمک مدل ساختار سرعتی پوسته و نسبت سرعت امواج لرزه‌ای (Vp/Vs) یکسان، دوباره تعیین محل (relocation) شده و پارامترهای وابسته به مکان‌یابی رویدادهای دارای ثبت زمانی مشابه، مقایسه شده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد رویدادهای دارای ویژگی‌های دقت مناسب در خواندن فاز(معمولاً بیش از ۸ فاز)، حداقل فاصله از ایستگاه‌ها (Dmin) کمتر از ۲۵ کیلومتر، ثبت در بیش از ۶ ایستگاه (NST)، پوشش آزیموتی مناسب ($\text{Gap} \leq 180^\circ$) و خطای باقیمانده زمانی (RMS) کمتر از ۰/۳۵ ثانیه در هر دو شبکه، دقت و برازش بهتری داشته‌اند. میانگین خطای مکان‌یابی در رومرکز و ژرفای رویدادهای انتخابی مشابه، در شبکه منطقه‌ای عموماً بیش از ۶ و ۱۵ کیلومتر و در شبکه محلی به ترتیب کمتر از ۳ و ۵ کیلومتر بوده است. همچنین با وجود اهمیت خطای باقیمانده زمانی، کاهش این متغیر به‌تنهایی برای بهبود تعیین محل رویداد، کافی نبوده است. در حالی که کاربرد مدل پوسته همراه با سایر پارامترهای مناسب دیگر، به‌ویژه میانگین فاصله ایستگاهی و کاهش همزمان خطای باقیمانده زمانی، موجب افزایش دقت (و کاهش خطای) مکان‌یابی شده است. در نتیجه، معیارهای مکان‌یابی در شبکه محلی بهتر از شبکه منطقه‌ای بوده است.

واژه‌های کلیدی: داده‌های زمانی مشابه، مکان‌یابی، محلی، منطقه‌ای.

۱. مقدمه

نامناسب ایستگاه‌ها یا پوشش آزیموتی ناکافی (Gap)، با چالش همراه بوده است؛ گاهی این مسئله بسیار مهم، اگرچه به لحاظ تعداد و توزیع ایستگاه‌ها، کیفیت ثبت، پردازش و ایجاد بانک داده، برای شبکه‌های لرزه‌نگاری اجتناب‌ناپذیر بوده اما همواره قابل تأمل است. اینکه آیا فاصله بیش از ۳۵ و بعضاً تا ۹۰ کیلومتری ایستگاه‌ها از یکدیگر در شبکه منطقه‌ای لرزه‌نگاری تهران، از منابع مهم و اجتناب‌ناپذیر عدم قطعیت مکان‌یابی لرزه‌ها بوده است، نیازمند بررسی دقیق‌تری خواهد بود، زیرا با وجود خطا در رومرکز و عمق رویدادها، امکان تعیین هندسه گسلی و نسبت دادن فعالیت به ساختارهای لرزه‌ای، همواره با چالش و پرسش روبه‌رو خواهد بود. مناسب‌ترین روش در تعیین عمق رویدادها، استفاده از زمان‌های رسید امواج لرزه‌ای ثبت‌شده در شبکه متراکم محلی است

مطالعات و پژوهش‌های زمین‌لرزه‌شناسی، با توجه به پیامدهای مخاطره‌آمیز زمین‌لرزه روی جوامع انسانی و زیرساخت‌های اجتماعی-اقتصادی و همچنین به عنوان دانش و فناوری نوین برای شناخت ماهیت و فرایندهای فیزیکی کره زمین، اهمیت بسزایی دارند. اساسی‌ترین هدف شبکه‌های لرزه‌نگاری تعیین محل هرچه دقیق زمین‌لرزه‌هاست (هاوسکوف و همکاران، ۲۰۱۲). مکان‌یابی دقیق زمین‌لرزه شامل زمان، مختصات جغرافیایی رومرکز و ژرفای کانونی رویداد لرزه‌ای، از مهم‌ترین معیارها در بررسی‌های لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساختی، بانک داده (کاتالوگ)، بررسی انفجارات و تحلیل خطر لرزه‌ای است (بندار و همکاران، ۲۰۰۴). در میان ویژگی‌های مکانی و زمانی، تعیین دقیق ژرفای چشمه زمین‌لرزه عموماً به دلیل تعداد کم ایستگاه‌های لرزه‌نگاری نزدیک، توزیع

(مگی و همکاران، ۲۰۰۲).

به همین منظور، شبکه لرزه‌نگاری محلی موقتی در سال ۲۰۰۶ شامل ۴۸ ایستگاه در طول ۵۱/۵ تا ۵۳ و عرض ۳۵/۴ تا ۳۶ درجه، از شرق تهران تا فیروزکوه (TEFIR) و از ایوانکی تا رینه در جنوب قلّه دماوند، نصب و خردلرزه‌های این منطقه ثبت و پردازش شده‌اند (عباسی و همکاران، ۲۰۱۰؛ عباسی و همکاران، ۲۰۱۲؛ تاتار و همکاران، ۲۰۱۲). فاصله بین ایستگاه‌ها در این شبکه از ۷ تا ۱۵ کیلومتر برحسب شرایط محلی و دسترسی، متغیر بوده است.

در این مطالعه، معیارهای مکان‌یابی و پارامترهای وابسته شامل زمان رخداد (origin time)، پوشش آزیموتی (azimuthally gap=Gap)، خطای باقیمانده زمانی (time residual error =RMS)، تعداد ایستگاه‌های دارای ثبت مناسب (number of stations =NST) و تعداد فازهای مناسب (number of phases)، کمترین فاصله رویداد از ایستگاه (minimum distance=Dmin) و خطای مکانی (spatial error)، در مورد زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده توسط شبکه لرزه‌نگاری محلی موقت سال ۲۰۰۶ و داده‌های شبکه لرزه‌نگاری تهران و پیرامون (۱۷ ایستگاه) در گستره ۵۰ تا ۵۴ و ۳۵ تا ۳۷ درجه، مد نظر قرار گرفته است.

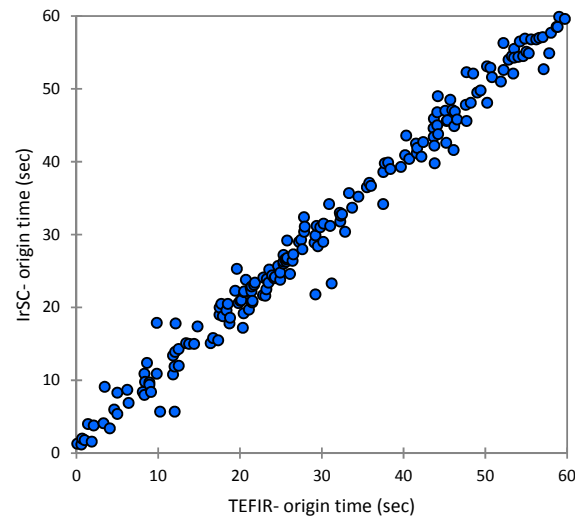
گستره پیرامون تهران بر مبنای داده‌های خردلرزه‌ای ثبت‌شده در شبکه محلی (موقت و یا دائمی) در کارهایی مانند اشتري و همکاران (۲۰۰۵) و یمنی‌فرد و مرادی (۱۳۹۰) مطالعه و بررسی شده است. در این مورد، مطالعه ۲۰۰۵ بیشتر به خردلرزه‌خیزی (همراه با برآورد مدل ساختار سرعتی پوسته) منطقه و مطالعه ۱۳۹۰، به‌طور عمده به ساختار سرعتی پوسته و عمق موهو در جنوب شرق تهران پرداخته است. در این مطالعات، به‌ندرت معیارهای مکان‌یابی و پارامترهای وابسته به آن، توصیف شده‌اند.

از اهداف مهم این مطالعه، علاوه بر امکان بهبود مکان‌یابی برخی لرزه‌های ثبت‌شده در بازه زمانی مشترک توسط ایستگاه‌های این دو شبکه محلی (موقت و متراکم) و منطقه‌ای (دائمی و کم‌تراکم)، توجه بیش از پیش به بهبود مکان‌یابی از طریق ارزیابی معیارها و پارامترهای وابسته به آن به‌منظور افزایش دقت نسبی در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها بوده است.

۲. روش پژوهش

۲-۱. داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه شامل بیش از ۴۰۰ لرزه ثبت‌شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IrSC, S-files) و بیش از ۹۰۰ لرزه ثبت‌شده توسط شبکه لرزه‌نگاری محلی موقت (TEFIR, S-files) در لبه جنوبی البرز مرکزی به مدت ۲۲ هفته (از ۲۵ ژوئن تا ۲۳ نوامبر سال ۲۰۰۶) است (عباسی و همکاران، ۲۰۱۰؛ عباسی و همکاران، ۲۰۱۲؛ تاتار و همکاران، ۲۰۱۲). فایل گزارش داده‌های مکان‌یابی‌شده که یکی از خروجی‌های برنامه تعیین محل در نرم‌افزار ساین (S-files) است، اطلاعات لازم برای تشکیل کاتالوگ داده‌ها را در خود نگهداری می‌کند و همچنین زمان قرائت فازهای لرزه‌ای در مقابل نام هر کدام از ایستگاه‌های ثبت رویداد نیز در آن‌ها قابل مشاهده است. سپس داده‌های دارای ثبت زمانی مشابه و مناسب از میان داده‌های هر دو شبکه به‌دقت شناسایی و مجزا شده‌اند. در هر دو شبکه، ۲۰۱ رویداد مشابه جستجو شده که در شبکه محلی موقت، ۱۸۰ رویداد از آن‌ها در ۳ ایستگاه یا بیشتر، ثبت شده‌اند. منظور از داده‌های مشابه، رویدادهایی است که از نظر زمان رخداد (origin time) در کاتالوگ‌های بالا، در سال، ماه، روز و دقیقه، یکسان بوده‌اند و به‌طور عمده کمتر از ۵ ثانیه اختلاف زمانی داشته‌اند (شکل ۱).

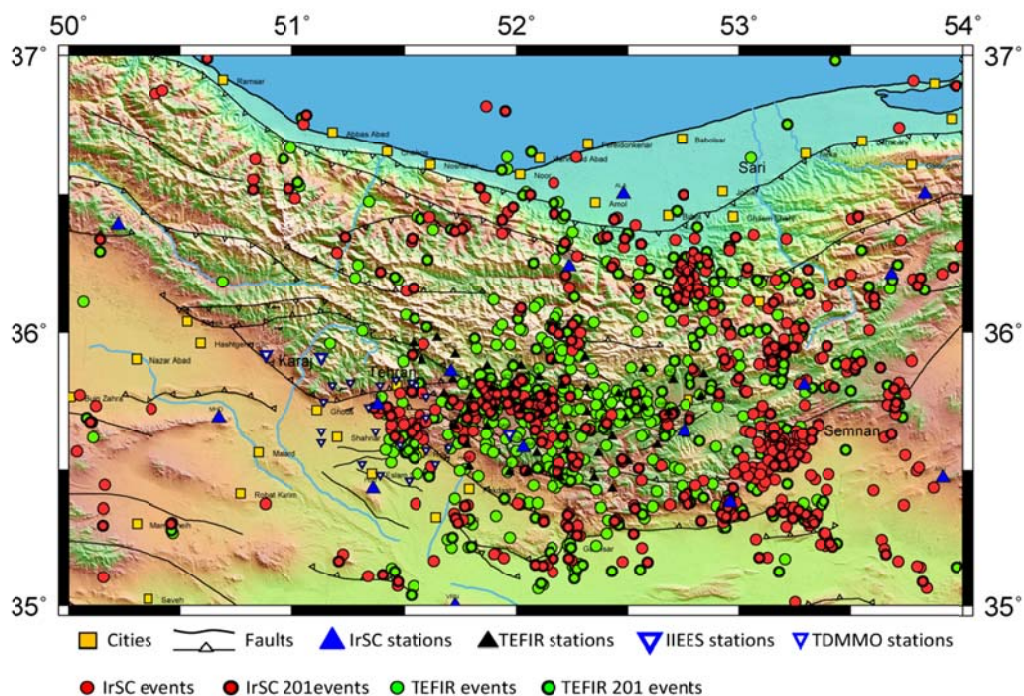


شکل ۱. زمان رخداد (origin time) رویدادهای مشابه ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSC) و محلی (TEFIR) در سال ۲۰۰۶.

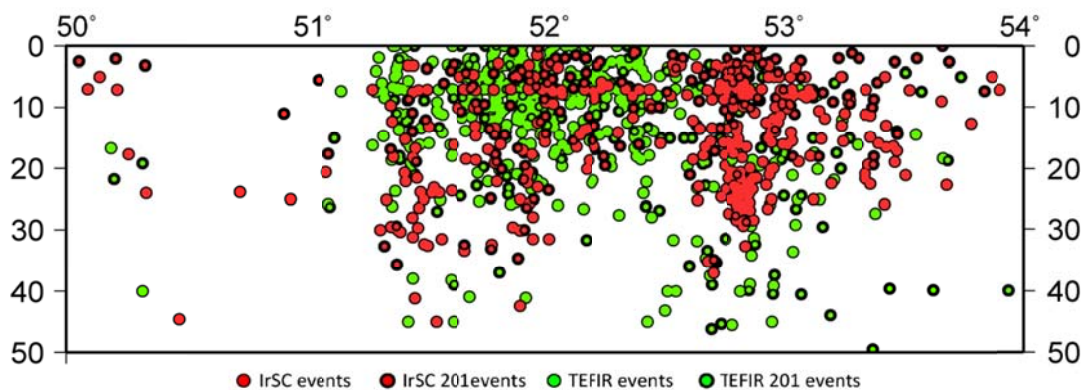
لرزه‌ای در مقیاس‌های زمانی ماه، هفته و ساعت به ترتیب در نمودار شکل ۳ نمایش داده شده است. آهنگ ثبت در ماه‌های جولای تا اکتبر، تقریباً یکسان و ثبت داده‌ها در دو ماه آغازین و پایانی (ژوئن و نوامبر ۲۰۰۶) به ترتیب به مدت ۶ و ۲۳ روز صورت گرفته است. آهنگ ثبت رویدادهای مشابه دارای ثبت مشترک در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای نیز در این نمودار نمایان است؛ افزایش نسبی ثبت رویدادها در ساعات ۷ تا ۸ به وقت جهانی (GMT)، چیرگی لرزه‌های محلی مشکوک به انفجار یا فعالیت‌های معدن‌کاری و کارهای عمرانی آشکار است. این زمان در بین ساعات ۱۰ تا ۱۲ به وقت محلی که شرایط برای عملیات انسان‌ساخت فراهم است، با ثبت حدود ۱۲۵ لرزه در شمال باختری استان سمنان (جنوب خاوری فیروزکوه) که حداقل ۱۵ تا ۲۰ رویداد آن‌ها مشکوک به نظر می‌رسد، در اوج قرار داشته است. باید یادآور شد که در نگاشت‌های شبکه محلی با وجود نزدیکی ایستگاه‌های این شبکه به لرزه‌های انسان‌ساخت و مشکوک، چنین رویدادهایی به صورت مشاهدات چشمی، فیلتر کردن و نیز توجه به زمان رخداد لرزه‌های مشکوک، تا حد ممکن از کاتالوگ شبکه محلی پالایش شده‌اند.

داده‌های ثبت‌شده در شبکه محلی موقت در دو فرمت Hypo71 (SISMALP) و Hypocenter (SEISAN) قابل تبدیل به یکدیگر هستند و در دو بانک داده مجزا، نگهداری شده‌اند. همچنین رویدادهای دارای ثبت زمانی مشابه در کاتالوگ داده‌های شبکه منطقه‌ای IrSC نیز پس از جستجو، در یک دسته داده جداگانه قرار داده شده‌اند. سپس برنامه Hyp در نرم‌افزار ساین (هاوسکوف و اتومولر، ۲۰۰۵) روی آن‌ها اجرا و از خروجی‌ها، گزارش‌گیری (report hyp.out) شده است.

در نقشه و مقطع لرزه‌ای (شکل ۲) توزیع ایستگاه‌های این شبکه‌ها، لرزه‌های ثبت شده توسط آن‌ها و رویدادهای دارای ثبت زمانی مشابه در هر کدام از آن‌ها، جداگانه نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که داده‌های لرزه‌نگاری موجود در منطقه مورد مطالعه، شامل سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDMMO)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IrSC) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) نیز به همراه داده‌های خام شبکه محلی، همزمان تبدیل فرمت، فازخوانی و پردازش شده‌اند. کارکرد دو شبکه محلی و منطقه‌ای در ثبت رویدادهای

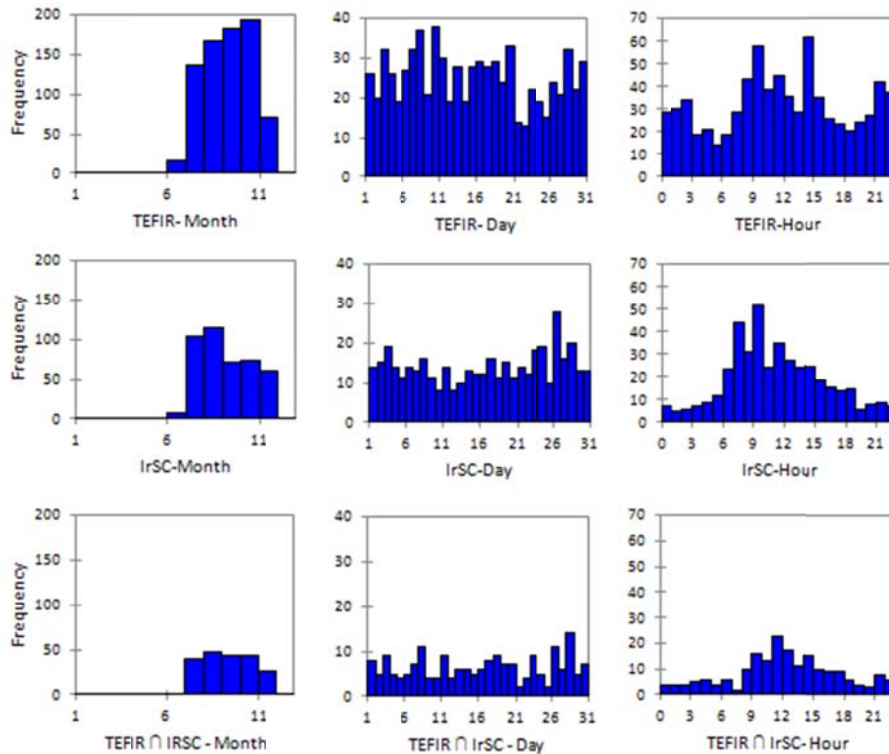


(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) داده‌های لرزه‌ای ثبت شده توسط دو شبکه منطقه‌ای لرزه‌نگاری تهران و شبکه محلی در ۲۲ هفته در سال ۲۰۰۶. دایره‌های قرمز و سبز به ترتیب نشان‌دهنده رویدادهای ثبت شده توسط شبکه منطقه‌ای و شبکه محلی موقت هستند. داده‌های دارای ثبت زمانی مشابه توسط هر شبکه نیز با دایره‌های داخلی کوچک‌تر در درون همان دایره‌ها مشخص شده‌اند. نشانه‌های سه گوش آبی توپر محل ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای تهران (IrSC)، سه گوش‌های مشکی توپر محل ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری محلی ۲۰۰۶ (TEFIR)، سه گوش‌های آبی توخالی بزرگ و کوچک به ترتیب محل ایستگاه‌های شبکه لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDDMMO) را نمایش می‌دهند. کپه‌هایی از مجموعه دایره‌های قرمز که در مختصات جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۷ و ۵۳ تا ۵۳/۵ درجه بیشتر خودنمایی می‌کنند، ثبت احتمالی لرزه‌های انفجاری و مشکوک هستند. این لرزه‌ها بیشتر در کاتالوگ شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای دیده شده‌اند. (ب) مقطع لرزه‌ای در عرض ۳۶ درجه نقشه شکل ۱-الف از توزیع عمقی همه رویدادها. ارقام عمودی این مقطع بر حسب کیلومتر و رویدادهای مربوطه تا عمق ۵۰ کیلومتری نمایش داده شده‌اند. به خط شیب‌دار ناشی از تمرکز داده‌های قرمز رنگ (مربوط به کاتالوگ شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای) در عمق حدود ۱۰ کیلومتری، به طور عمده با عمق پیش فرض نرم افزار تعیین محل این رویدادها، همخوانی دارند. رویدادهای دارای عمق بیش از ۳۵ کیلومتر در هر دو شبکه با خطای عمده مکان‌یابی روبه‌رو بوده و کمتر قابل اعتماد هستند. این موضوع در اعماق بیش از ۳۵ کیلومتر در مورد شبکه لرزه‌نگاری محلی که کمتر به عمق پیش فرض متکی است، خودنمایی بیشتری داشته است.



شکل ۳. نمودار ماهانه، روزانه و ساعتی تعداد ثبت رویدادها توسط دو شبکه محلی (TEFIR) و منطقه‌ای (IrSC) در شش ماهه ژوئن تا نوامبر سال ۲۰۰۶. فراوانی رویدادها در شبکه محلی در بالا، در شبکه منطقه‌ای در وسط و فراوانی رویدادهای مشابه ثبت شده توسط هر دو شبکه، یعنی اشتراک آن‌ها در ثبت رویدادها (TEFIR ∩ IrSC) در پایین شکل نشان داده شده است. باید توجه شود که افزودن رویدادهای مشابه در این شکل، با هدف استنباط مناسب‌تری از شانس ثبت رویدادهای لرزه‌ای و مقایسه کارکرد دو شبکه منطقه‌ای و محلی بوده است. هماهنگی ماهانه و روزانه در تعداد ثبت رویدادها در هر دو شبکه، در ثبت ساعتی رویدادهای مشابه نیز دیده می‌شود. افزایش ثبت رویدادها از حدود ۲۰ رویداد در همه ساعات شبانه‌روز برای شبکه منطقه‌ای و از حدود ۴۰ رویداد برای شبکه محلی، در ساعت‌های ۷:۰۰ تا ۱۶:۰۰، نشان از افزایش فعالیت‌های انسان ساخت (مانند کارهای عمرانی، معدنی و انفجاری) و احتمال ثبت آن‌ها توسط ایستگاه‌های لرزه‌نگاری دارد. در همین ساعت‌ها، با وجود تلاش برای تشخیص و جداسازی رویدادهای غیر زمین‌لرزه‌ای از فایل داده‌ها، احتمال آغشته‌بودن رویدادهای مشابه به انفجار نیز وجود دارد.

مشکوک در فواصل ایستگاهی کمی دور (مثلاً در بیش از ۳۰ کیلومتری) از ایستگاه‌های ثبت رویداد، به‌سختی امکان‌پذیر بوده است.

۲-۲. روش پردازش

اصولاً در تعیین محل زمین‌لرزه در شبکه‌های لرزه‌نگاری به روش خطی عمل می‌شود. اساس روش خطی برای مکان‌یابی داده‌ها در گزارش هر کدام از کاتالوگ داده‌ها، به شرح زیر است.

تاکنون الگوریتم‌های زیادی برای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها ایجاد شده است که اغلب بر اساس معادلات گایگر

با وجود هماهنگی در ثبت ماهانه، هفتگی و ساعتی در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای، اینکه آهنگ ثبت از یک روند میانگین قابل احتساب برای هر کدام از شبکه‌ها تجاوز نموده، پرسش‌برانگیز است. پاسخ به این پرسش را می‌توان در تفاوت پیوستگی زمانی کارکرد، توانایی و قابلیت ثبت رویدادها و تعداد ایستگاه‌های ثبت در هر شبکه (یا شانس شبکه در ثبت رویداد) و آغشتگی کاتالوگ‌های هر دو شبکه به رویدادهای مشکوک (غیر زمین‌لرزه‌ای)، جستجو کرد. باید این واقعیت را یادآور شد که با وجود روش‌های مختلف تشخیص و تفکیک رویدادهای انفجاری از زمین‌لرزه، تشخیص لرزه‌های

چشمه به گیرنده (برای هر کدام از فازهای P و S) تنها به مشاهدات زمان رسید در ۳ ایستگاه لرزه‌نگاری نیاز است. بدیهی است، وجود تعداد بیشتر ایستگاه‌های دارای قرائت زمان رسید، در کاهش خطای باقیمانده زمانی مؤثر خواهد بود. گسیل موج از چشمه به گیرنده‌هایی که در فواصل مختلف پیرامون چشمه قرار دارند، در مسیرهای گوناگون از خواص فیزیکی محیط انتشار تأثیر پذیرفته و سرعت یکسانی را در همه جهات ندارند. در نتیجه ثبت شکل موج (waveform) و زمان رسید یکسان در فاصله‌های یکسان ایستگاه‌های گیرنده از چشمه لرزه‌ای، در عمل روی نگاشت اتفاق نمی‌افتد. برای دستیابی به برآورد بهینه‌ای از موقعیت مکانی و زمانی چشمه، خطای باقیمانده زمانی با روش میانگین حداقل مربعات (RMS, root mean square) اندازه‌گیری می‌شود و به مقدار کمینه‌ای کاهش می‌یابد (لی و لاهر، ۱۹۷۵).

در نرم‌افزارها و برنامه‌های تعیین محل، مدل یک‌بعدی ساختمان سرعت امواج در پوسته زمین، به‌عنوان پارامتر ورودی برنامه منظور می‌شود. نسبت سرعت امواج پیکره‌ای پوسته (Vp/Vs) نیز پارامتر ورودی دیگری است که در برنامه مورد نظر اعمال می‌شود تا امکان محاسبه سرعت هر یک از فازهای لرزه‌ای (P, S) در هر لایه از پوسته فراهم شود.

برای این مطالعه، از برنامه‌های پوستر، نرم‌افزار ساین و فایل گزارش داده‌های هر دو شبکه (S-files) در محیط سیستم عامل ویندوز، استفاده شده است. سپس پارامترهای وابسته به مکان‌یابی رویدادهای مشابه (ثبت زمانی تقریباً یکسان) در هر دو شبکه، با دقت مقایسه و ارزیابی شده‌اند. از آنجا که فایل داده‌های مربوط به این کاتالوگ‌ها با خطاهای سیستمی و انسانی همراه هستند و همچنین نابرازش‌هایی در ورودی مدل پوسته و نسبت سرعت امواج وجود دارد، به‌ناچار نتایج مکان‌یابی رویدادها، حتی با وجود دقت در تشخیص و خواندن فازها، به انحراف از واقع (bias) خواهد انجامید. بنابراین پرداختن به سرچشمه عمده این خطاها، اجتناب‌ناپذیر بوده است. منشاء عمده

(۱۹۱۲) عمل می‌کنند. در این روش یک نقطه (X_0, Y_0, Z_0, t_0) به‌عنوان مکان و زمان رخداد زمین‌لرزه منظور می‌شود و سپس با فرض تغییرات بسیار اندک در مکان و زمان، بسط سری تیلور، برای تقریب خوبی از باقیمانده زمانی (t_i) در ماتریس معادلات به کار می‌رود. حل عددی این معادلات در روابط خطی بین زوج زمان‌رسیدهای مشاهداتی (t^0) - محاسباتی (t^c) در هر ایستگاه (i) و تکرار حل تا کاهش و کمینه‌کردن باقیمانده زمانی (residual time) یعنی کاهش اختلاف زمانی بین مشاهدات و محاسبات، ادامه می‌یابد. برنامه مکان‌یابی Hypo71 (لی و لاهر، ۱۹۷۵) برای نخستین بار بر مبنای معادلات گایگر نوشته و اجرا شده است (روابط ۱ تا ۴). برنامه مکان‌یابی رویدادهای لرزه‌ای Hypocenter (لاینرت و همکاران، ۱۹۸۶؛ لاینرت، ۱۹۹۱؛ لاینرت و هاسکوف، ۱۹۹۵) که در نرم‌افزار SEISAN (هاوسکوف و اتومولر، ۲۰۰۵) استفاده می‌شود نیز بر همین مبنا نوشته شده است.

$$t_i^c = T(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) + t_0 \quad (1)$$

$$r_i = t_i^o - t_i^c \quad (2)$$

$$r_i = (\partial T / \partial x_i) \Delta x + (\partial T / \partial y_i) \Delta y + (\partial T / \partial z_i) \Delta z + \Delta t \quad (3)$$

$$r = Gm \quad (4)$$

در این معادلات، r ، بردار باقیمانده زمانی هر ایستگاه، G ماتریس مشتقات جزئی و بردار m مدل مورد جستجوی مسئله است.

در معادلات ۱ و ۲، اندیس‌های ۰ و i به ترتیب نشانگر زمان در چشمه (مبدأ) و مکان در ایستگاه لرزه‌نگاری مربوطه و بالانویس‌های c و o نیز به ترتیب بیانگر زمان محاسباتی و مشاهداتی (روی لرزه‌نگاشت) هستند. معادله دیفرانسیلی ۳ نیز تغییرات تابع زمانی چشمه T ، در فواصل مکانی مختلف (x, y, z) را برای بردار باقیمانده زمانی r در هر ایستگاه i ، ارزیابی می‌کند. برای حل معادله ۱ و با تقریب اولیه مناسبی از سرعت موج گسیل شده از

عباسی و همکاران، ۲۰۱۰) دوباره اجرا و رویدادهای مورد نظر دوباره مکان‌یابی (relocation) شده‌اند.

واقعیت یکتایی رویدادها از این نظر که هر رویداد ثبت شده در محدوده محلی توزیع ایستگاه‌های لرزه‌نگاری، تنها و تنها دارای یک مختصات مکانی و زمان رخداد است، امکان مقایسه دقیق‌تر این معیارها را در مورد رویدادهای دارای ثبت زمانی مشابه در هر دو شبکه فراهم می‌کند. همچنین تأثیرات ناشی از تشخیص و خواندن فازها و نیز مسیر پرتو امواج لرزه‌ای، در محاسبات و برآوردهای مربوط به تعیین مکان و پارامترهای وابسته دخالت کرده و در مقادیر عددی آن‌ها نمایان می‌شوند؛ بنابراین در فایل‌های اجرایی و خروجی برنامه مکان‌یابی در دو فایل hypsum.out و report.out مربوط به هر کدام از دسته داده‌های دو شبکه محلی و منطقه‌ای پارامترهایی مانند عرض، طول، عمق، خطاهای رومرکز و کانون، زمان رخداد و خطای آن، گاف آزیموتی و خطای باقیمانده زمانی، محاسبه و گزارش می‌شوند. به همین دلیل، مقایسه و تحلیل این خروجی‌ها، تقریب مناسبی از این خطاها را نیز آشکار خواهد کرد.

همچنین برای دستیابی به نوعی از برازش بین پارامترهای خروجی از یک نوع، روابط مختلف روی داده‌های مشابه هر دو شبکه (۲۰۱۱ رویداد) مورد آزمون قرار گرفته‌اند. در این آزمون، عمدتاً از طریق رابطه خطی (linear robust fitness) این سازگاری و همخوانی بین پارامترهای همگون برقرار گردیده است (جدول ۱). همان‌گونه که در ستون‌های جدول ۱ از چپ به راست دیده می‌شود، در مورد عمق، پوشش آزیموتی و خطای باقیمانده زمانی لرزه‌ها، سازگاری (همخوانی) بسیار کمی بین گزارش‌های دو شبکه وجود دارد. اما این سازگاری در مورد عرض و طول جغرافیایی، خوب (به ترتیب ۹۴٪ و ۹۸٪) و به‌ویژه در مورد زمان رخداد در مبدأ به مراتب بهتر و نزدیک به ۱۰۰٪ است. در ستون ۷ جدول، میانگین بزرگای رویدادهای ثبت شده نیز برای شبکه محلی و منطقه‌ای به ترتیب اندکی کمتر از ۱/۹ و ۲ است.

خطاها و عدم قطعیت‌های همراه با مکان‌یابی رویدادهای این مطالعه را می‌توان در عوامل و واقعیت‌های زیر خلاصه کرد:

- تشخیص و خواندن صحیح فازهای لرزه‌ای P و S شامل (Pg, Sg, Pn, Sn phase readings and or phase pickings)،

- مدل ساختار سرعتی پوسته در منطقه مورد مطالعه (one dimension- crustal velocity structure)،

- نسبت سرعت امواج پیکره‌ای پوسته (Vp/Vs)،
- اثرات مسیر پرتو امواج لرزه‌ای (seismic ray path effects) از چشمه به ایستگاه گیرنده امواج.

تشخیص درست فاز (phase reading) و نشان‌دار کردن آغاز آن (phase picking) در مورد فازهای لرزه‌ای P و S (Pg, Sg, Pn, Sn) به‌عنوان ورودی‌های برنامه تعیین محل، در فایل گزارش داده‌های هر دو شبکه بدون هرگونه تصحیح زمانی و ایستگاهی در این مطالعه، دست نخورده باقی مانده است تا امکان مقایسه فراهم باشد.

مسیر پرتو امواج لرزه‌ای در فاصله بین محل محاسباتی چشمه تا محل ایستگاه، متأثر از ساختار سرعتی محیط انتشار امواج لرزه‌ای است. اگر مدل بیانگر این ساختار به واقعیت نزدیک باشد، محل محاسبه نیز نزدیک به واقع خواهد بود. در غیر این صورت (که در عمل نیز اتفاق می‌افتد) محل محاسباتی چشمه (مکان‌یابی زمین‌لرزه) نیز غیرواقعی و دارای عدم قطعیت است؛ بنابراین محل منتسب به کانون (رومرکز) الزاماً محل واقعی (غیر قابل مشاهده) رویداد را نشان نمی‌دهد. این بدان معنا است که مکان‌یابی نیز مانند مدل، دارای عدم قطعیت آشکاری است؛ البته این مهم به پارامتر ورودی دیگر یعنی نسبت Vp/Vs نیز وابسته است. در این مطالعه برای مقایسه مکان‌یابی رویدادهای گزارش‌شده در هر دو کاتالوگ (TEFIR and IrSC S-files) و به منظور پرهیز از تأثیرات ناشی از این دو ورودی، برنامه مکان‌یابی بر روی دسته داده‌های انتخابی هر دو شبکه، کاملاً جداگانه و با استفاده از مدل ساختار سرعتی و نسبت سرعت یکسان (برگرفته از مطالعه

جدول ۱. برازش خطی و مقایسه پارامترهای خروجی اجرای برنامه تعیین محل روی گزارش داده‌های ثبت زمانی مشابه هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای.

Table 1: Linear relation comparisons of the estimated parameters for the reported IrSC and TEFIR networks data (S-fies)	Depth (km)	Latitude (dg)	Longitude (dg)	Origin time (sec)	RMS (sec)	Range and Mean Values of M_i
	Robust Linear Fitness or Misfit					
	m, mX, mY parameters are in the vertical Δm , $\sqrt{\Delta L}$ linear relation and text directions in the related columns. m2 are mean values, mean value variances, root square of the $\sqrt{\Delta m}$, ΔmX , mY, square mean X and mean Y variances of the TEFIR (X), IrSC (Y) parameters, respectively.					
Column No →	1	2	3	4	5	6
IrSC Report (Y) vs Hypocenter (X) (The two catalogue commonly reported 201 events by IrSC and TEFIR networks)	$Y = 0.139 X + 9.188$, R-square = 0.118 11.64, 6.06, 16.44, 10.38	$Y = 0.95 X + 1.703$, R-square = 0.94 0.107, -0.016, 35.81, 35.83	$Y = 0.987 X + 0.648$, R-square = 0.98 0.121, 0.004, 52.499, 52.496	$Y = X + 0.0143$, R-square = 1 1.610, -0.472, 30.114, 31.125	$Y = 0.779 X + 0.259$, R-square = 0.097, 0.186, -0.037, 0.243, 0.279	TEFIR; 1-3.4 (1.86), IrSC; 0.9-3.7 (1.96)

داده) یکسان است و از بررسی و ارزیابی بیشتر آن صرف نظر می‌شود. عمده این خطاها با وجود پوشش آزمون مناسب، در مورد شبکه منطقه‌ای ناشی از تشخیص یا نادرست خواندن فاز یا دوری کانون رویداد از ایستگاه‌های ثبت کننده آن‌ها و در مورد شبکه محلی، به‌طور عمده ناشی از دوری کانون از ایستگاه‌های ثبت کننده بوده است. این نتیجه در مورد رویدادهای شماره ۱۰ و ۱۱ مربوط به هر دو شبکه که علاوه بر پوشش آزمون، به ایستگاه‌های گیرنده شبکه محلی نسبتاً نزدیک بوده‌اند، به‌روشنی قابل استنباط است.

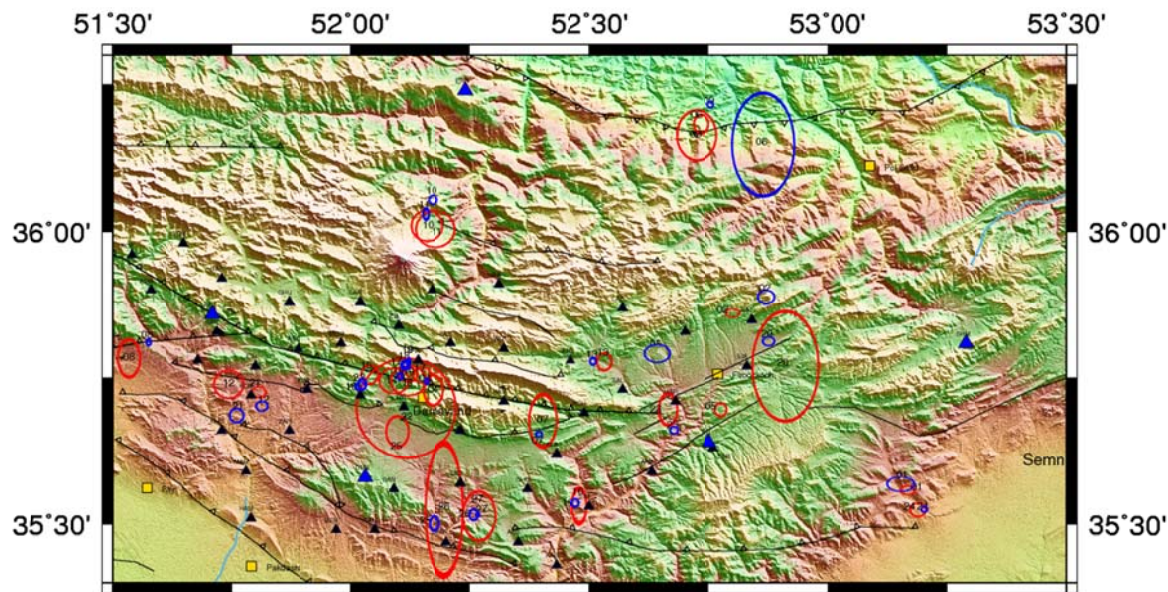
تأثیرات مسیر انتشار امواج لرزه‌ای برای رویدادهای مشابه درون محدوده تحت پوشش شبکه محلی که توسط ایستگاه‌های مربوط به هر دو شبکه در این محدوده، ثبت و تعیین محل شده‌اند، قابل ارزیابی و تحلیل است. رویدادهای مشابه مورد نظر شامل ۱۷ رویداد (شماره‌های ۴، ۵، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۵، ۲۶ و ۲۷) هستند که حداقل توسط یکی از ۳ ایستگاه شبکه منطقه‌ای دماوند، افجه و فیروزکوه (نشانه‌های DAM, AFJ, FIR در نقشه) ثبت و فازخوانی

همخوانی دو کاتالوگ در مورد معیارهایی مانند عمق و پوشش آزمون، بسیار اندک (به ترتیب ۱۲٪ درصد و ۱۸٪ درصد) است. این ناهمخوانی به‌ویژه در مورد داده‌های مشابه ثبت شده در هر دو شبکه، تمرکز بر روی معیار پوشش آزمون برابر یا کمتر از ۱۸۰ درجه را پیشنهاد و تقویت کرده است. در این صورت، تنها خطاهای باقیمانده در فایل داده‌های مشابه در هر دو شبکه، به تعیین و خوانش فازها، تأثیرات مسیر انتشار امواج لرزه‌ای و نابرازش مدل ساختار سرعتی پوسته مربوط خواهند شد.

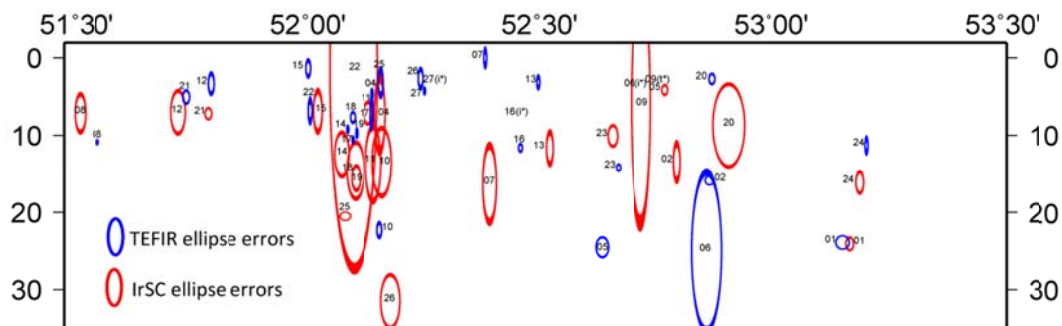
بر همین اساس دسته داده‌های مشابه ۲۷ تایی در هر دو شبکه با عنوان TEFIR27 و IrSC27 نیز از بین دسته داده‌ها انتخاب و جداگانه بررسی شده‌اند (شکل ۴-الف و ۴-ب). در این مطالعه، نابرازش مدل پوسته با واقعیت محیط انتشار امواج لرزه‌ای، با اجرای دوباره (Relocation) برنامه تعیین مکان رویدادهای مربوط به هر دو شبکه توسط یک مدل، خطای ناشی از این ورودی را برای خروجی‌های قابل مقایسه یکسان نموده است. در نتیجه، اثر مدل مذکور برای هر دو فایل ورودی (بانک

خوانش فاز و روش سعی و خطای (trial and error) معمول در کاهش خطای باقیمانده زمانی، همراهی شده است.

شده‌اند. بررسی فایل گزارش داده‌های شبکه منطقه‌ای نشان داد که این اثر به دلیل دخالت فازهای ثبت شده در ایستگاه‌های دورتر در برنامه تعیین محل، با خطای



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) داده‌های لرزه‌ای مشابه دارای پوشش آزمون‌ی برابر یا کمتر از ۱۸۰ درجه، ثبت‌شده توسط دو شبکه منطقه‌ای لرزه‌نگاری تهران (IrSC) و شبکه محلی (TEFIR) در ۲۲ هفته در سال ۲۰۰۶. بیضی‌های قرمز و آبی به ترتیب نشان‌دهنده خطای افقی طولی و عرضی (E_{rx} , E_{ry}) رویدادها در نقشه مربوط به شبکه منطقه‌ای و شبکه محلی موقت هستند. برای گویایی بهتر، بیضی‌های خطا با دو برابر بزرگ‌نمایی خطاهای طولی و عرضی نمایش داده شده‌اند. شماره داده‌های مشترک توسط هر شبکه نیز با اعداد کوچک‌تر در درون یا کنار همان بیضی‌ها مشخص شده‌اند. ب) مقطع نمایش‌دهنده بیضی‌های خطای لرزه‌ای شکل ۳-الف. بیضی‌های قرمز و آبی به ترتیب نشان‌دهنده خطای طول و عمق (E_{rx} , E_{rz}) در مقطع رویدادهای ثبت‌شده توسط شبکه منطقه‌ای و شبکه محلی موقت هستند. شماره داده‌های مشترک توسط هر شبکه نیز با اعداد کوچک‌تر، درون یا کنار همان بیضی‌ها مشخص شده‌اند. بیضی‌های رویدادهای شماره ۶ و ۲۷ (T^*) مربوط به شبکه منطقه‌ای و رویداد شماره ۹ (T^*) مربوط به شبکه محلی، به دلیل خطای ژرفای بسیار بالا، در مقطع لرزه‌ای شکل ۳ نمایش داده نشده و محل آن‌ها در مقطع نشان داده شده است. به خطای ژرفای نسبتاً بالا تا بسیار بالای مربوط به رویدادهای شماره ۲، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۲۰، ۲۲، ۲۴ در شبکه منطقه‌ای و همچنین به خط‌شدگی نسبی برخی از آن‌ها پیرامون عمق ۱۰ کیلومتری دقت شود. به خطای ژرفای بالای رویداد شماره ۶ مربوط به شبکه محلی نیز توجه شود.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

در این مطالعه، داده‌های گزارش شده (s-files) مربوط به هر دو شبکه در سه دسته جداگانه قرار داشته‌اند. دسته اول، همه داده‌های ثبت شده در بیش از ۳ ایستگاه (شامل فایل‌های: 553EF و IrSC431)، دسته دوم داده‌های مشابه (شامل فایل‌های: TEFIR201 و IrSC201) و دسته سوم، داده‌های مشابه دارای $\text{Gap} \leq 180^\circ$ (شامل فایل‌های: TEFIR27 و IrSC27) را در بر می‌گیرند. داده‌های شبکه محلی، خود در دو فرمت مختلف در دو دسته داده (553EF و TEFIR777) قرار داشته‌اند که ابتدا به فرمت هایپوستر تبدیل شده و سپس داده‌های مشابه با شبکه منطقه‌ای (TEFIR27, TEFIR201) از بین آن‌ها مجزا شده‌اند. چکیده نتایج حاصل از گزارش‌گیری و بازمکان‌یابی رویدادها به کمک اجرای برنامه‌هایپوستر در نرم‌افزار ساینز، روی دسته داده‌های مختلف هر دو شبکه (شامل فایل‌های: IrSc201, IrSC27, IrSc431, 553EF, TEFIR27, TEFIR201, TEFIR777) در جدول‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است. در جدول ۲ میانگین پارامترهای مهم گزارش شده در کاتالوگ‌های هر دو شبکه، به تفکیک در دسته داده‌های مختلف انتخاب شده، آورده شده است. در جدول ۳ مشخصات زمانی، مکانی و برخی پارامترهای وابسته به مکان‌یابی دسته داده انتخابی ۲۷ تایی و در جدول ۴ میانگین پارامترهای مهم پس از اجرای برنامه بازمکان‌یابی روی دسته داده‌های مختلف هر دو شبکه و به تفکیک ارائه شده است. همچنین در جدول ۵ پارامترهای مربوط به بازمکان‌یابی (relocation) دسته داده‌های ۲۷ تایی دارای پوشش آزمون‌ی برابر یا کمتر از ۱۸۰ درجه در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای نشان داده شده‌اند.

در جدول ۴ میانگین کمترین فاصله بین محل رخداد تا ایستگاه‌های ثبت (Dmin)، تعداد ایستگاه‌های گیرنده و بزرگای اندازه‌گیری شده مربوط به رویدادها نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، میانگین فاصله ایستگاه‌های ثبت کننده رویدادها در شبکه

محلی متراکم، کمتر از ۱۵ کیلومتر و در مورد شبکه منطقه‌ای بیش از ۳۴ کیلومتر بوده است.

با نگاهی به پراکندگی دسته داده ۲۷ تایی در نقشه و مقطع شکل ۴ و جدول‌های ۳ و ۵، توزیع ایستگاه‌های لرزه‌نگاری گیرنده در پیرامون نزدیک بیش از ۲۰ رویداد مشابه ثبت شده در هر دو شبکه، همراه با کاربرد یک مدل ساختار سرعتی در اجرای برنامه بازمکان‌یابی آن‌ها، شرایطی را فراهم کرده تا از اثر نسبی مسیر انتشار برای ایستگاه‌های درون این محدوده، صرف‌نظر شود. با مراجعه به S-files دو شبکه، ملاحظه شد که خطای زمانی ناشی از تشخیص و خواندن فازها در رخداد خطای بسیار بالای ژرفی مانند رویدادهای شماره ۲، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ در جدول ۵، نقش اساسی داشته است؛ البته همچنان بخشی از خطای ناشی از اثر نسبی مسیر انتشار در محتوای زمان مشاهداتی (تعیین و خوانش فازهای لرزه‌ای) در هر دو کاتالوگ و به‌ویژه در ایستگاه‌های شبکه منطقه‌ای بیرون از محدوده شبکه محلی، برای رویدادهای شماره ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۲۴ باقی خواهد ماند (جدول ۶).

معیار نزدیک‌ترین فاصله ایستگاه ثبت تا رویداد ثبت شده، برای رویدادهای دارای عمق مشابه (دارای تفاوت در محدوده بیضوی خطای عمق) که فاصله و مسیر انتشار از کانون به ایستگاه گیرنده برای آن‌ها تقریباً مشابه یا یکسان است، قضاوت و ارزیابی بهتری برای خواندن فازها در گزارش داده‌های دو شبکه فراهم کرده است. در این مورد و با نگاهی به رویدادهای شماره ۱، ۱۰، ۲۲، ۲۳ و ۲۴ در جدول ۶، با وجود ناچیز شدن اثر مسیر انتشار، همچنان خطای زمانی ناشی از تشخیص و خواندن فازها، به‌ویژه در داده‌های شبکه منطقه‌ای آشکار است. به‌عنوان نمونه، خطای تشخیص فاز (Pn به جای Pg) در رویداد شماره ۲۳ شبکه منطقه‌ای و فاصله میانگین ایستگاهی نسبتاً زیاد در رویداد شماره ۳ در شبکه محلی، RMS بالا (۱/۴۴) را رقم زده است. در رویداد شماره ۲۳، با وجود RMS کم در شبکه منطقه‌ای،

اما خطای طولی، عرضی و عمقی، به ترتیب ۶/۲، ۳/۶ و ۸ کیلومتر باقی گذاشته است. در حالی که این خطاها برای شبکه محلی، به ترتیب ۱/۳، ۱/۴ و ۲/۴ بوده است.

است؛ البته منشأ برخی از این خطاها، همچنان مربوط به عدم قطعیت و محدودیت‌های اجتناب‌ناپذیر بوده است.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای مربوط به گزارش دسته داده‌های مختلف ثبت‌شده در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای.

	Sec	Latitude (dg)	Longitude (dg)	Depth (km)	NST	RMS (sec)	GAP (dg)	M _i	
TEFIR	TEFIR777	30.036	35.356	51.762	14.47	9	0.434	239.8	1.53
	553EF	30.060	35.733	52.225	14.06	17	0.209	222.8	1.49
IrSC431		30.098	35.747	52.659	14.48	7	0.236	172.1	1.69
common recorded data ۲۰۱ by TEFIR and IrSC as local and regional network respectively	TEFIR201 (TEFIR777 ∩ 553EF)	31.224	35.810	52.499	16.40	18	0.287	257.6	1.86
	IrSC201	29.435	35.826	52.496	10.40	9	0.281	168.3	1.96
	TEFIR, Gap ≤ 180°	30.201	35.730	52.398	12.63	26	0.263	117.3	1.76
	∩ IrSC Gap ≤ 180°	30.551	35.748	52.403	10.37	8	0.309	154.1	1.72

جدول ۳. پارامترهای مربوط به گزارش دسته داده‌های ۲۷ تایی دارای پوشش آریزوتومی برابر یا کمتر از ۱۸۰ درجه در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای.

Table 3: No.	2006, Date and Time					TEFIR Catalogue (Data base)						IrSC Catalogue (Data base)								
	M	D	HR	Min	Sec	Lat (dg)	Lon (dg)	Depth (km)	NST	RMS (sec)	GAP(dg)	M _i	Sec	Lat (dg)	Lon (dg)	Depth (km)	NST	RMS (sec)	GAP (dg)	M _i
01	07	03	06	42	33.7	35.5	53.2	23.4	03	0.00	148	Nan	33.7	35.5	53.2	27.8	03	0.0	132	1.0
02	07	03	09	30	29.5	35.8	52.8	15.0	20	0.41	142	2.2	28.4	35.9	52.8	8.9	06	0.3	146	1.7
03	07	16	16	33	24.3	35.7	53.7	16.5	21	0.22	179	1.9	24.2	35.7	53.7	18.0	10	0.4	150	1.8
04	07	20	09	10	46.3	35.7	52.2	4.48	37	0.13	76	1.7	46.9	35.7	52.2	5.3	07	0.1	156	1.8
05	07	25	00	06	47.7	35.8	52.7	26.8	09	0.08	131	1.1	52.3	35.7	52.8	1.5	04	0.4	174	0.9
06	07	27	10	51	1.86	36.0	52.8	46.1	20	0.85	168	1.7	1.60	36.2	52.7	5.0	09	0.5	177	1.7
07	08	14	14	25	49.0	35.7	52.4	0.00	12	0.20	77	1.5	49.5	35.7	52.4	13.0	09	0.5	151	1.5
08	08	15	00	33	54.0	35.8	51.6	13.3	62	0.17	80	2.2	54.4	35.8	51.5	3.7	14	0.5	60	2.6
09	08	18	11	55	58.7	36.2	52.8	3.10	16	0.20	174	2.0	58.5	36.2	52.7	5.0	10	0.7	149	1.9
10	08	20	19	15	33.3	36.0	52.2	31.7	26	0.24	146	1.9	35.7	36.0	52.2	4.3	11	0.5	123	1.5
11	08	20	19	22	21.5	35.9	52.1	11.6	47	1.27	146	1.9	20.9	36.0	52.2	2.0	12	0.5	92	2.1
12	08	29	08	28	21.1	35.7	51.8	2.05	26	0.28	88	1.7	19.7	35.8	51.7	10.7	04	0.4	178	1.7
13	09	03	17	35	25.7	35.8	52.5	2.11	33	0.21	79	1.9	26.3	35.8	52.5	10.1	10	0.3	82	1.7
14	09	04	11	30	20.0	35.7	52.1	11.8	60	0.30	70	2.6	20.9	35.7	52.1	6.6	14	0.4	80	2.7
15	09	06	12	55	23.9	35.7	52.0	3.66	38	0.28	50	1.3	24.4	35.7	52.0	5.1	04	0.3	160	1.6
16	09	07	10	12	25.3	35.5	52.5	13.6	46	0.17	144	1.6	26.0	35.5	52.5	15.4	06	0.4	150	1.5
17	09	08	01	09	21.7	35.8	52.1	13.6	34	0.16	65	1.3	23.1	35.8	52.2	2.0	04	0.3	180	1.2
18	09	08	22	52	40.2	35.8	52.1	12.1	19	0.17	91	1.9	40.9	35.7	52.1	12.3	07	0.3	88	1.9
19	09	08	22	53	38.4	35.8	52.1	12.9	67	0.20	64	2.7	39.0	35.8	52.1	14.3	14	0.3	86	2.8
20	09	24	06	36	04.6	35.8	52.9	3.10	16	0.20	112	1.6	06.0	35.8	52.9	4.3	05	0.2	167	1.5
21	09	28	08	36	22.8	35.7	51.7	8.39	24	0.30	113	1.8	24.1	35.7	51.8	9.3	04	0.2	144	1.7
22	09	28	14	32	23.3	35.7	52.0	10.1	39	0.38	49	2.0	23.9	35.7	52.0	4.7	09	0.1	77	2.1
23	10	02	12	29	20.5	35.7	52.7	13.3	18	0.20	98	2.1	22.1	35.7	52.7	10.0	07	0.3	162	1.7
24	10	11	03	01	43.7	35.5	53.2	18.6	08	0.05	143	Nan	43.4	35.5	53.2	15.3	06	0.2	119	1.4
25	10	16	11	38	30.2	35.5	52.2	8.06	20	0.29	154	1.7	29.0	35.7	52.1	19.6	48	0.1	142	1.5
26	11	07	10	46	11.8	35.5	52.3	3.10	08	0.20	174	1.4	10.8	35.5	52.2	26.3	07	0.3	127	1.7
27	11	12	10	49	1.00	35.5	52.3	3.50	10	0.00	171	1.6	01.8	35.5	52.3	6.0	07	0.1	153	1.6

جدول ۴. مقایسه میانگین پارامترهای مربوط به اجرای برنامه مکان‌یابی روی دسته داده‌های مختلف ثبت‌شده در هر دو شبکه محلی و منطقه‌ای.

	Sec	Timing Error (sec)	Latitude (dg)	Lat Error, Ery (km)	Longitude (dg)	Lon Error, Erx (km)	Depth (km)	Depth Error, Erz (km)	NST	RMS (sec)	GAP (dg)	Dmin (km)	No of phases	M _i
TEFIR	TEFIR	0.414	35.600	10.5	52.384	11.3	20.3	20.7	7	0.148	254.1	28.3	12	1.65
	553EF	0.511	35.736	7.8	52.218	7.1	12.2	17.6	11	0.214	208.3	16.9	15	1.54
IrSc431		0.699	35.687	6.9	52.738	8.0	18.0	23.2	6	0.211	178.1	36.8	8	1.68
۲۰۱ events	TEFIR201	0.510	35.741	1.9	52.396	1.9	12.3	5.2	27	0.265	116.0	13.8	25	1.81
	IrSc201	1.104	35.757	6.9	52.395	5.3	9.9	۸.۷۱	9	0.319	133.5	33.5	9	1.73
	TEFIR, Gap ≤ 180°	0.628	35.746	2.6	52.417	2.4	10.4	۴.۹	19	0.309	118.4	14.5	28	1.76
	∩ IrSc Gap ≤ 180°	1.009	35.738	7.5	52.410	6.1	11.1	15.7	8	0.306	161.9	34.8	9	1.72

جدول ۵. پارامترهای مربوط به بازماندگی دسته داده‌های ۲۷ تایی دارای پوشش آزمون‌ی برابر یا کمتر از ۱۸۰ درجه در شبکه محلی و منطقه‌ای.

Table5: No.	2006, Date and Time TEFIR/IrSC					O.T. Error (sec)	Latitude (dg)	Ery (km)	Longitude (dg)	Erx (km)	Depth (km)	Erz (km)	NST	RMS (sec)	Gap (dg)	Dmin (km)	No of Phases	MI
	M	D	HR	Min	Sec													
01	07	03	06	42	33.73	0.32	35.569	2.8	53.153	5.1	23.9	5.1	03	0.03	165	27.2	05	Non
	07	03	06	42	33.58	0.29	35.558	1.7	53.168	2.8	24.1	4.7	03	0.01	158	27.2	06	1.0
	07	03	09	30	27.65	0.43	35.888	2.6	52.870	3.2	15.9	3.2	13	0.18	158	16.6	16	2.1
02	07	03	09	30	27.56	0.29	35.861	1.6	52.801	2.6	13.5	14.4	06	0.02	145	65.8	06	1.7
	07	16	16	33	23.12	1.35	35.758	6.8	53.704	9.1	27.3	27.6	16	1.44	152	37.6	12	1.9
03	07	16	16	33	23.93	1.22	35.734	4.9	53.672	7.5	7.1	53.9	09	0.35	142	149.4	08	1.8
	07	20	09	10	46.05	0.48	35.744	1.0	52.157	0.8	4.6	3.0	29	0.25	48	4.0	44	1.7
04	07	20	09	10	45.84	1.13	35.729	5.9	52.173	3.9	7.4	27.2	07	0.35	156	21.1	12	1.8
	07	25	00	06	47.66	0.58	35.792	3.4	52.642	4.8	24.5	7.7	08	0.16	140	7.0	09	1.1
05	07	25	00	06	50.92	0.57	35.696	2.5	52.776	2.2	4.1	3.8	04	0.13	176	6.4	08	0.9
	07	27	10	51	00.91	1.32	36.148	19.5	52.864	11.6	25	61.9	12	0.90	188	37.8	12	1.7
06	07	27	10	51	00.84	0.68	36.183	3.5	52.734	2.9	3.6	156.7	09	0.38	169	44.7	10	1.7
	08	14	14	25	49.09	0.73	35.654	1.1	52.393	1.2	0.0	6.6	12	0.22	77	5.4	21	1.5
07	08	14	14	25	48.32	1.52	35.677	9.8	52.402	5.1	16.3	29.3	09	0.53	152	32.1	13	1.5
	08	15	00	33	53.92	0.50	35.811	1.1	51.575	0.9	10.9	1.8	40	0.33	77	4.4	68	2.2
08	08	15	00	33	53.53	1.35	35.784	7.1	51.534	4.2	7.1	15.2	14	0.48	133	50.6	16	2.6
	08	18	11	55	58.58	0.31	36.216	1.1	52.754	1.1	3.4	119.9	16	0.16	177	41.9	28	2.0
09	08	18	11	55	58.60	1.11	36.164	9.6	52.725	7.6	6.1	90.1	10	0.51	148	44.3	08	1.9
	08	20	19	15	33.50	0.46	36.054	1.7	52.172	1.7	22.3	5.1	22	0.25	116	21.8	33	1.9
10	08	20	19	15	34.46	1.42	36.010	5.9	52.159	6.1	13.7	29.9	10	0.47	129	26.8	14	1.5
	08	20	19	22	19.54	0.57	36.03	2.2	52.156	1.2	7.0	11.3	30	0.27	177	29.4	45	1.9
11	08	20	19	22	19.60	1.37	36.004	6.9	52.177	7.5	13.5	26.8	12	0.40	124	65.8	14	2.1
	08	29	08	28	20.96	0.83	35.702	1.8	51.813	2.2	3.3	7.7	19	0.41	91	6.6	26	1.7
12	08	29	08	28	19.26	0.80	35.739	5.3	51.744	5.5	7.0	16.5	04	0.31	167	13.3	07	1.7
	09	03	17	35	25.41	0.62	35.779	1.3	52.508	1.1	3.1	4.2	29	0.33	79	4.9	40	1.9
13	09	03	17	35	25.37	0.89	35.778	3.2	52.532	2.7	11.7	13.0	10	0.29	92	25.1	16	1.7
	09	04	11	30	19.88	0.61	35.753	1.2	52.102	0.9	9.2	2.7	39	0.31	57	9.6	61	2.6
14	09	04	11	30	19.74	1.49	35.745	4.9	52.090	5.6	12.5	17.3	14	0.42	84	19.3	16	2.7
	09	06	12	55	23.81	0.86	35.736	1.5	52.020	1.8	1.3	6.0	23	0.40	79	2.0	31	1.3
15	09	06	12	55	23.36	0.55	35.756	3.7	52.040	3.2	6.9	15.2	04	0.12	170	19.8	07	1.6
	09	07	10	12	25.29	0.48	35.536	1.5	52.471	1.3	11.6	2.6	25	0.26	123	2.5	43	1.6
16	09	07	10	12	25.45	0.93	35.531	6.5	52.480	2.7	7.3	248.2	06	0.28	146	27.7	10	1.5
	09	08	01	09	21.64	0.46	35.773	1.2	52.113	0.9	10.6	2.5	21	0.22	65	9.4	37	1.3
17	09	08	01	09	21.65	0.53	35.755	3.1	52.148	3.4	7.1	8.6	04	0.26	177	22.4	07	1.2
	09	08	22	52	40.16	0.57	35.772	1.8	52.113	1.7	7.7	3.7	15	0.24	91	9.4	24	1.9
18	09	08	22	52	39.68	1.65	35.745	5.6	52.119	6.6	14.6	21.7	07	0.47	101	20.2	10	1.9
	09	08	22	53	38.31	0.44	35.779	1.1	52.121	0.6	9.7	2.2	38	0.23	63	8.5	68	2.7
19	09	08	22	53	37.96	0.92	35.755	2.7	52.120	3.3	15.6	9.4	14	0.32	84	21.2	17	2.8
	09	24	06	36	04.69	0.69	35.813	1.7	52.875	2.2	2.7	3.9	16	0.24	112	6.0	23	1.6
20	09	24	06	36	04.89	0.54	35.770	20.9	52.910	12.4	8.7	32.8	05	0.23	170	85.0	08	1.5
	09	28	08	36	22.83	0.72	35.686	2.7	51.761	2.6	5.0	5.1	15	0.32	109	4.0	24	1.8
21	09	28	08	36	23.37	0.34	35.726	1.9	51.807	2.5	7.2	4.2	04	0.09	144	16.8	06	1.7
	09	28	14	32	23.06	0.86	35.739	2.0	52.024	1.5	6.8	8.5	28	0.45	50	13.0	40	2.0
22	09	28	14	32	22.67	6.74	35.698	18.9	52.116	18.9	1.5	154.9	09	1.74	109	15.3	12	2.1
	10	02	12	29	20.36	0.61	35.661	1.3	52.676	1.4	14.2	2.4	18	0.22	98	8.4	28	2.1
23	10	02	12	29	21.62	1.23	35.696	6.2	52.664	3.6	10.1	8.0	07	0.41	161	10.1	12	1.7
	10	11	03	01	43.95	0.31	35.525	1.1	53.203	1.2	11.3	5.9	04	0.08	139	27.2	08	Non
24	10	11	03	01	43.68	0.37	35.524	2.6	53.189	3.0	16.1	8.3	06	0.09	138	26.2	06	1.4
	10	16	11	38	30.14	0.73	35.501	2.7	52.175	1.8	3.2	9.7	15	0.34	155	9.6	21	1.7
25	10	16	11	38	28.92	0.40	35.658	5.8	52.097	4.2	20.5	3.3	47	0.07	239	10.7	06	1.5
	11	07	10	46	11.85	0.65	35.516	2.1	52.258	1.7	2.6	6.5	8	0.21	174	9.9	14	1.4
26	11	07	10	46	10.11	0.78	35.525	25.3	52.195	7.3	31.5	20.1	07	0.19	189	15.7	05	1.7
	11	12	10	49	01.00	0.28	35.516	0.6	52.266	0.8	4.2	2.3	10	0.08	171	9.3	19	1.6
27	11	12	10	49	00.87	0.69	35.514	9.2	52.269	6.1	3.1	999.9	07	0.21	142	22.5	09	1.6

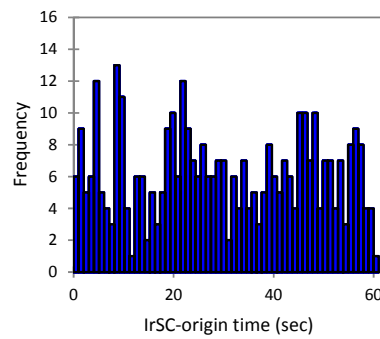
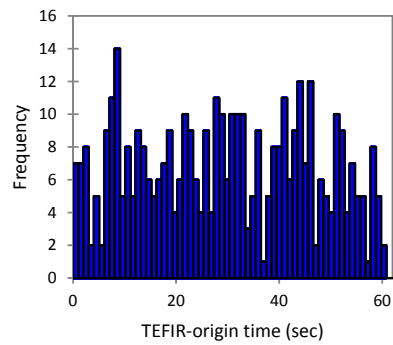
جدول ۶. برخی دلایل مربوط به خطای بالا و عدم قطعیت تعدادی از رویدادهای بازماندگی شده در دو شبکه محلی و منطقه‌ای.

Table 6: some error and uncertainties No. TEFIR/ IrSC	Origin Time and Error (sec)		Depth (km)	RMS (sec)	Dmin (km)	Cause of Errors and or uncertainties
01	33.73	0.32	23.9	0.03	27.2	Low NST (3), no severe error
	33.58	0.29	24.1	0.01	27.2	Low NST (3), no severe error
03	23.12	1.35	27.3	1.44	37.6	A relatively large Dmin
	23.93	1.22	7.1	0.35	149.4	A large Dmin and Error in phase readings
06	00.91	1.32	25	0.90	37.8	A relatively large Dmin
	00.84	0.68	3.6	0.38	44.7	A relatively large Dmin and Error in phase readings
09	58.58	0.31	3.4	0.16	41.9	A relatively large Dmin
	58.60	1.11	6.1	0.51	44.3	A relatively large Dmin
10	33.50	0.46	22.3	0.25	21.8	no severe error
	34.46	1.42	13.7	0.47	26.8	Error in phase readings
11	19.54	0.57	7.0	0.27	29.4	A relatively large Dmin
	19.60	1.37	13.5	0.40	65.8	A large Dmin and Error in phase readings
22	23.06	0.86	6.8	0.45	13.0	no severe error
	22.67	6.74	1.5	1.74	15.3	Error in phase detecting
23	20.36	0.61	14.2	0.22	8.4	no severe error
	21.62	1.23	10.1	0.41	10.1	Error in phase readings
24	43.95	0.31	11.3	0.08	27.2	Low NST (4), no severe error
	43.68	0.37	16.1	0.09	26.2	no severe error

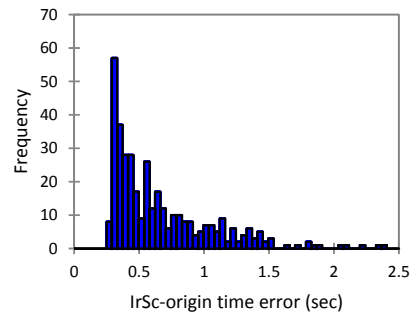
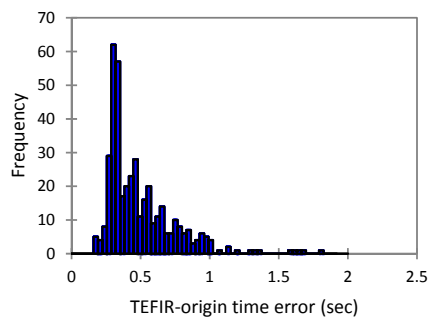
(Erz)، خطای باقیمانده زمانی (RMS) و پوشش آزمایشی (Gap) رویدادها را نشان می‌دهند. خطای مکانی افقی (horizontal error) از رابطه ساده (۵) به دست آمده است و بیانگر رابطه هندسی خطای افقی طولی (Er_x) و عرضی (Er_y) رومرکز رویدادها است.

$$Erh = \sqrt{(Er_x)^2 + (Er_y)^2} \quad (۵)$$

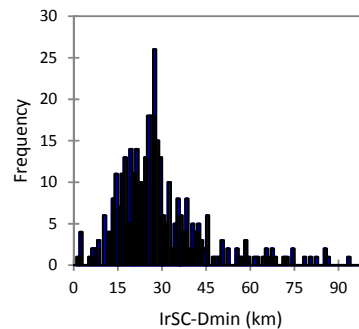
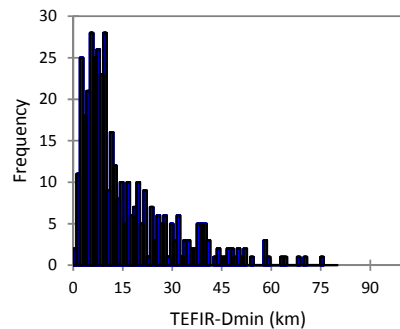
همچنین در شکل‌های (۵-الف تا ۵-ح)، نمودار معیارهای مختلف مربوط به مکان‌یابی رویدادهای ثبت شده توسط دو شبکه محلی و منطقه‌ای ارائه شده است. این معیارها، پراکندگی زمان رخداد (origin time) و خطای محاسباتی (origin time error) آن‌ها، کمترین فاصله تا ایستگاه ثبت رویدادها (D_{min})، خطای مکانی افقی (Er_h) و عمودی



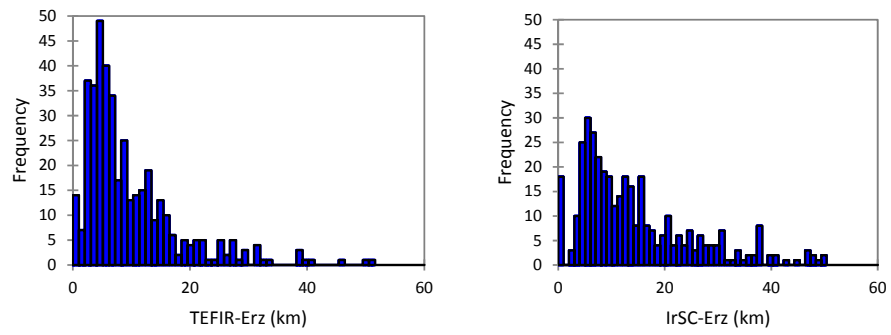
(الف)



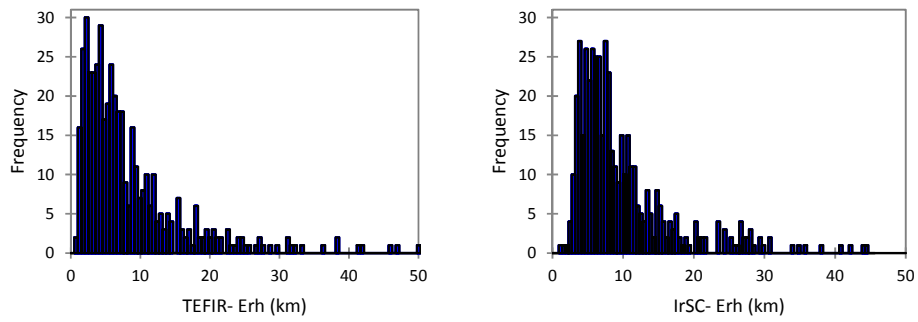
(ب)



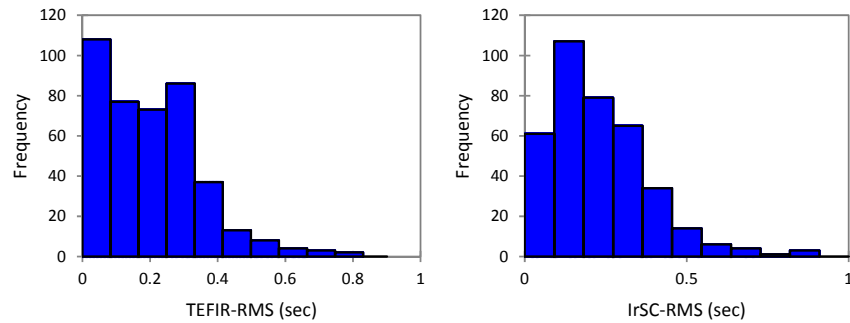
(پ)



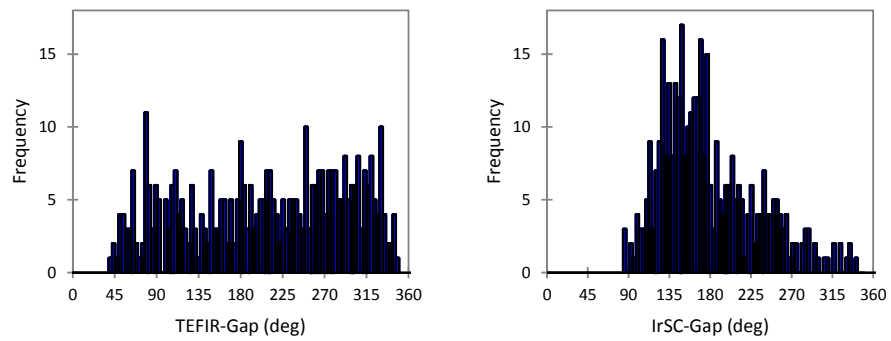
(ب)



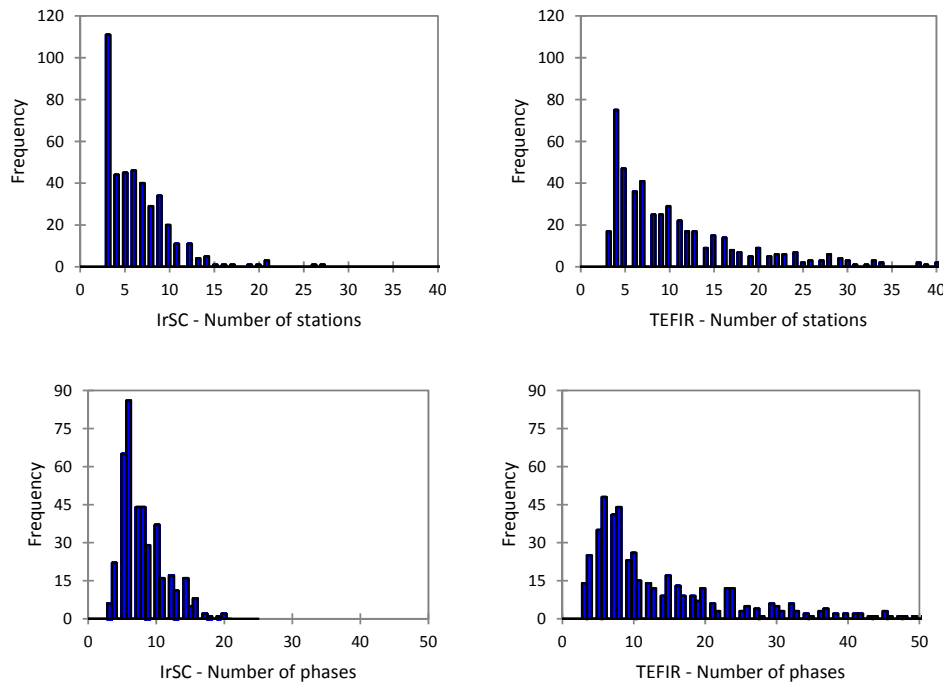
(ج)



(د)



(ه)



(ح)

شکل ۵. الف) نمودار زمان رخداد رویدادهای مشابه ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). نمودار خطای زمان رخداد رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی دارای خطای زمانی کمتر از ۰/۴ ثانیه و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای دارای خطای بیشتر از ۰/۷ ثانیه هستند. **ب)** نمودار کمترین فاصله تا ایستگاه رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی فاصله کمتر از ۱۲ کیلومتر و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای فاصله بیشتر از ۲۵ کیلومتر دارند. **ت)** نمودار خطای ژرفای کانونی (Erz) رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی خطای کمتر از ۷ کیلومتر و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای خطای بیشتر از ۱۰ کیلومتر دارند. **ث)** نمودار خطای افقی (Erh) رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی خطای کمتر از ۷ کیلومتر و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای خطای بیشتر از ۷ کیلومتر دارند. **ج)** نمودار خطای باقیمانده زمانی رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از ۹۰٪ رویدادهای شبکه محلی و منطقه‌ای دارای خطای باقیمانده زمانی کمتر از ۰/۵ ثانیه هستند. **چ)** نمودار پوشش آزمون‌ی (Gap) رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). پوشش آزمون‌ی بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی و منطقه‌ای به ترتیب بیشتر و کمتر از ۱۸۰ درجه هستند. عملکرد شبکه محلی در پوشش آزمون‌ی حدود ۴۰ درجه به بالا و در شبکه منطقه‌ای حدود ۹۰ درجه به بالا بوده است. **ح)** نمودار تعداد ایستگاه‌های ثبت و فازهای خوانده‌شده رویدادهای ثبت‌شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). برای بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی، بیش از ۶ ایستگاه ثبت وجود داشته و بیش از ۸ قرائت فاز انجام گرفته است. بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای در کمتر از ۶ ایستگاه ثبت شده‌اند و برای آن‌ها کمتر از ۶ فاز خوانده شده است.

رویدادها، آشکار است. خطای برآورد زمان رویداد در چشمه، در شبکه محلی به طور عمده بین ۰/۱۸ تا ۰/۷۵

تقریباً در همه معیارهای آمده در شکل ۵، وضعیت شبکه محلی به طور نسبی در برآورد و ارزیابی بهتر مکان‌یابی

دو شبکه محلی و منطقه‌ای، مشابه فرض شده است.

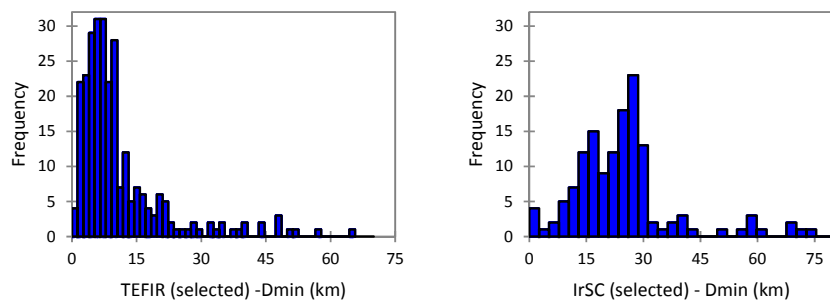
این مطالعه نشان می‌دهد که مکان‌یابی در هر صورت به فایل داده‌ها یعنی زمان رسید، تعیین و خوانش فازها و مدل ساختار سرعتی پوسته، وابستگی قطعی داشته است. مسئله مهم دیگر این است که اگرچه پوشش آزمون مناسب (معمولاً کمتر یا برابر ۱۸۰ درجه) برای تعیین محل رویداد لرزه‌ای اهمیت دارد، اما چنانچه این معیار در کنار شرایط محدودکننده دیگر مانند میانگین کمترین فاصله رویداد از ایستگاه‌ها (کمتر از ۲۵ کیلومتر)، تعداد ایستگاه‌های گیرنده (برابر یا بیش از ۶ ایستگاه)، تعداد فازهای مناسب (معمولاً بیش از ۸ فاز)، نسبت سرعت و مدل پوسته مناسب به کار رود، نتایج مکان‌یابی از قابلیت اعتماد و رضایت بخشی بیشتری برخوردارند.

معیار میانگین فاصله ایستگاه‌های گیرنده از رویداد ثبت‌شده، هنگامی که تعداد و توزیع نسبی رویدادها در شبکه تقریباً یکنواخت باشد، به مقدار میانگین فاصله ایستگاه‌های شبکه از یکدیگر نزدیک می‌شود. این معیار برای شبکه منطقه‌ای کمتر از ۳۵ و برای شبکه محلی کمتر از ۱۵ کیلومتر برآورد شده است. میانگین خطای مکان‌یابی رویدادهای مشترک (۲۷ رویداد انتخابی از بین ۲۰۱ رویداد) در شبکه منطقه‌ای عموماً بیش از ۶ کیلومتر در رومرکز و بیش از ۱۵ کیلومتر در ژرفای کانونی بوده است. این موضوع در مورد شبکه محلی کمتر از ۳ کیلومتر در رومرکز و کمتر از ۵ کیلومتر در ژرفای رویداد بوده است (شکل ۶ و جدول). این بدان معنا است که برای دستیابی به مکان‌یابی قابل اعتماد، فاصله ایستگاه‌های یک شبکه می‌بایست در مقادیر بهینه‌ای قرار گیرند.

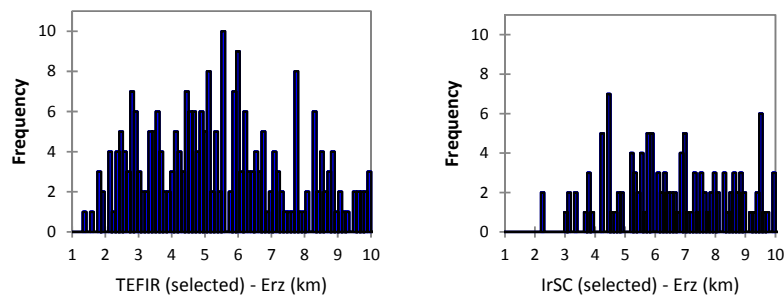
ثانیه (میانگین ۰/۴۰) و در مورد شبکه منطقه‌ای بین ۰/۲۶ تا بیش از ۱ ثانیه (میانگین ۰/۷۷) در نوسان بوده است. خطای ژرفای رویدادها نیز به طور عمده در شبکه محلی کمتر از ۱۰ کیلومتر و در مورد شبکه منطقه‌ای بیش از ۱۰ کیلومتر است. خطای باقیمانده زمانی نیز در مورد شبکه محلی بیش از ۹۰ درصد، کمتر از ۰/۴ و برای شبکه منطقه‌ای بیش از ۸۰ درصد، کمتر از ۰/۴ ثانیه به دست آمده است. تراکم شبکه محلی، امکان حداقل پوشش آزمون تا حدود ۴۰ درجه و فواصل نسبتاً زیاد ایستگاهی در شبکه منطقه‌ای، امکان پوشش آزمون حداقل حدود ۹۰ درجه (بیش از ۴۵ درجه اختلاف پوشش) را فراهم کرده‌اند. با وجود پوشش آزمون، کاهش کمترین فاصله در کاهش خطای مکانی، در نمودارهای بالا آشکار است. بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی در بیش از ۶ ایستگاه و در شبکه منطقه‌ای در کمتر از ۶ ایستگاه ثبت شده‌اند. برای بیش از نیمی از رویدادها در شبکه محلی، بیش از ۸ فاز و در شبکه منطقه‌ای کمتر از ۶ فاز خوانده شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

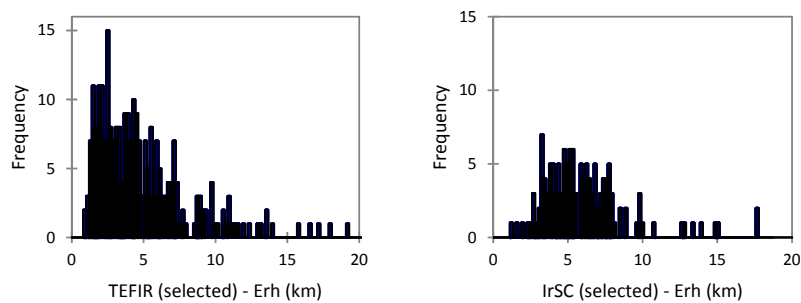
در این مطالعه برای پرهیز از نگاه جانبدارانه و انحراف از واقع، سنجش و ارزیابی آماری خطاهای انسانی در قالب ارزیابی معیارهای مکان‌یابی همراه با کاربرد مدل پوسته و نسبت سرعت، میانگین پارامترهای وابسته مانند زمان رخداد، پوشش آزمون، خطای باقیمانده زمانی، تعداد ایستگاه‌های دارای ثبت و فازهای مناسب، کمترین فاصله رویداد از ایستگاه و خطای مکانی، مد نظر قرار گرفته است. همچنین از پرداختن به خطای سیستمی ناشی از محدودیت و دقت تجهیزاتی و نرم‌افزاری یا کاستی‌های فناوریانه معمول و گاهی اجتناب‌ناپذیر، صرف‌نظر شده یا بروز آنها برای هر



(الف)



(ب)

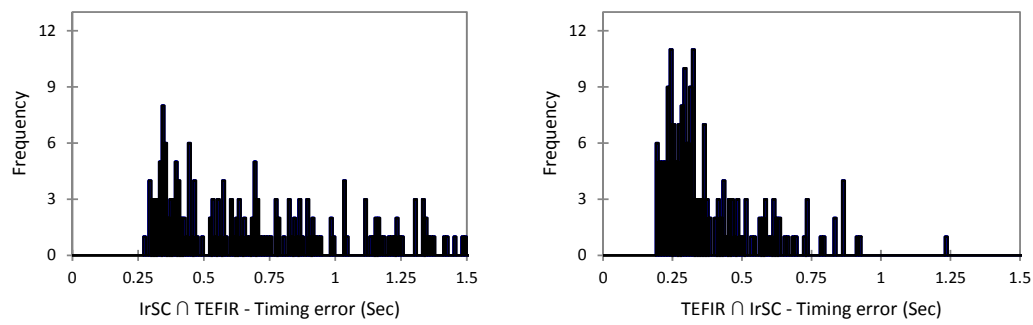


(پ)

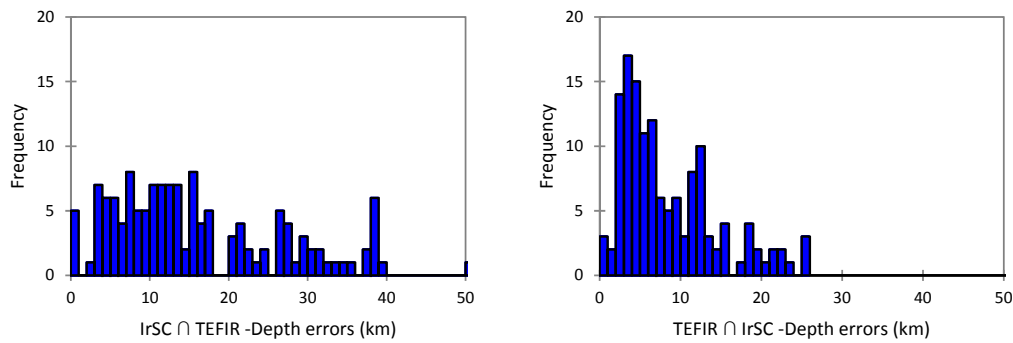
شکل ۶. الف) نمودار توزیع کمترین فاصله تا ایستگاه در شبکه لرزه‌نگاری محلی (TEFIR) و شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSC). این نمودارها با شرط خطای ژرفی کمتر از ۱۰ کیلومتر، انتخاب و سپس معیار کمترین فاصله برای آن‌ها ترسیم شده است. بیش از ۷۵ درصد از رویدادها در شبکه محلی، کمتر و در شبکه منطقه‌ای، بیشتر از ۱۵ کیلومتر از یکی از ایستگاه‌های ثبت فاصله دارند. ب) نمودار خطای ژرفی رویدادهای انتخابی شبکه لرزه‌نگاری محلی (TEFIR) و شبکه منطقه‌ای (IrSC). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی دارای خطای کمتر از ۵ کیلومتر و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای دارای خطای بیشتر از ۵ کیلومتر هستند. پ) نمودار خطای رومرکز (خطای افقی طولی و عرضی) رویدادهای انتخابی شبکه لرزه‌نگاری محلی (TEFIR) و شبکه منطقه‌ای (IrSC). بیش از نیمی از رویدادهای شبکه محلی دارای خطای کمتر از ۵ کیلومتر و بیش از نیمی از رویدادهای شبکه منطقه‌ای دارای خطای بیشتر از ۵ کیلومتر هستند.

محلی کمتر و به طور عمده بین ۰/۱۸ تا ۰/۷۵ ثانیه (میانگین ۰/۴۰) و در مورد شبکه منطقه‌ای بین ۰/۲۶ تا بیش از ۱ ثانیه (میانگین ۰/۷۷) در نوسان بوده است.

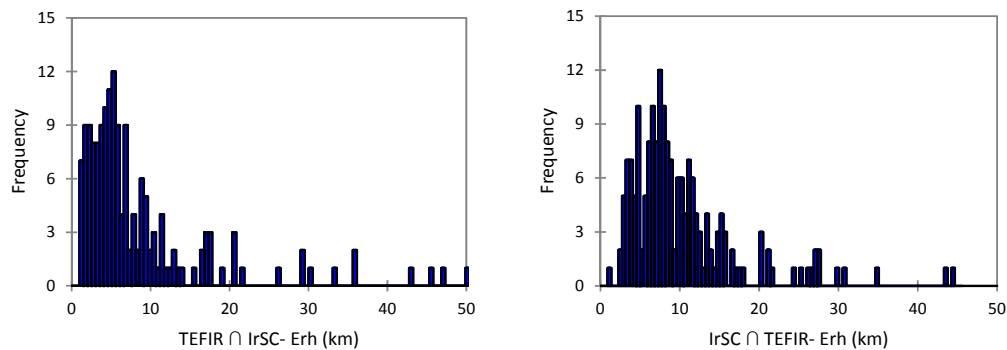
در شکل ۷ نمودار برآورد خطای زمانی محاسباتی چشمه‌های لرزه‌ای در دو شبکه محلی و منطقه‌ای نمایش داده شده است. به‌خوبی دیده می‌شود که این خطاها در شبکه



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۷. الف) خطای زمانی در زمان مبدأ رویدادهای مشابه در دو شبکه محلی (TEFIR) و منطقه‌ای (IrSC). خطای زمانی در شبکه محلی به طور عمده کمتر از ۰/۴ و در مورد شبکه منطقه‌ای بیشتر از ۰/۷ ثانیه بوده است. ب) نمودار توزیع خطای ژرفی رویدادهای مشابه در شبکه لرزه‌نگاری محلی (TEFIR) و شبکه منطقه‌ای (IrSC). بیش از نیمی از رویدادها در شبکه محلی خطای ژرفی کمتر از ۷ کیلومتر و در شبکه منطقه‌ای خطای ژرفی بیشتر از ۱۰ کیلومتر دارند. پ) نمودار توزیع خطای رومرکز (Erh) رویدادهای مشابه ثبت شده در دو شبکه لرزه‌نگاری منطقه‌ای (IrSc) و محلی (TEFIR). بیش از نیمی از رویدادها در شبکه محلی خطای رومرکز کمتر از ۵ کیلومتر و در شبکه منطقه‌ای خطای رومرکز بیشتر از ۷ کیلومتر دارند.

کنار تعداد ایستگاه‌ها و فاصله مناسب آن‌ها، جستجو و با دقت اجرا می‌شود. ضمن اینکه برای تعیین محل قابل اعتماد رویداد، دخالت فازهای خوانده شده در ایستگاه‌های

هرچند در برنامه‌های تعیین محل، روند رو به کاهش این پارامتر برای مکان‌یابی لازم است، اما این روند پس از حصول اطمینان از درستی و تعداد فازهای لرزه‌ای، در

دارای یک مختصات مکانی و یک زمان رخداد است، اجازه می‌دهد معیارهایی که بهبود نسبی بیشتری در مجموع پارامترهای وابسته به مکان‌یابی رویدادهای مشابه فراهم می‌کنند، قابل اعتمادتر قلمداد شوند. قدر مسلم اینکه، تراکم ایستگاه‌ها (۴۷ ایستگاه در گستره کوچک‌تر در برابر ۱۱۷ ایستگاه در گستره بزرگ‌تر) و دقت در ثبت نگاشت‌ها با توجه به آهنگ نمونه‌برداری (۱۰۰ هرتز در برابر ۵۰ هرتز) در شبکه محلی بیش از شبکه منطقه‌ای بوده است. همچنین تفکیک‌پذیری زمانی و شانس ثبت لرزه‌ها (۹۹۳ نسبت به ۴۳۱)، برای شبکه محلی به مراتب بیش از شبکه منطقه‌ای قابل تصور است. در همین حال، امکان ثبت نوفه‌های محیطی، انسان‌ساخت و انفجار برای شبکه محلی نیز بیش از شبکه منطقه‌ای فراهم بوده و در نتیجه آغشتگی داده‌های خام و نگاشت‌ها به این نوفه‌ها، بالاتر و نیاز به تفکیک و پالایش لرزه‌ها، بیشتر بوده است.

مقایسه معیارهای مکان‌یابی و پارامترهای وابسته در جدول ۴ شامل میانگین‌های مربوط به خطاهای مکانی، زمان رخداد و باقیمانده زمانی، تعداد ایستگاه‌های ثبت و فازهای خوانده‌شده، پوشش آزمون‌تومی و کمترین فاصله ایستگاه از رویداد لرزه‌ای، نشان می‌دهد که شبکه محلی در مقایسه با شبکه منطقه‌ای عملکرد راضی‌کننده‌تری داشته است. حتی با وجود پوشش آزمون‌تومی و تعیین و خوانش مناسب فازها در بسیاری از رویدادهای شبکه منطقه‌ای، دقت مکان‌یابی آنها نامناسب بوده است. این مسئله، به‌طور عمده به فاصله زیاد ایستگاه‌ها از یکدیگر (و از رویدادها) مربوط می‌شود. به همین دلیل، نتایج این مطالعه بر ضرورت توسعه و افزایش ایستگاه‌های این شبکه همراه با توزیع مناسب (کاهش فاصله ایستگاه‌ها به کمتر از ۳۰ کیلومتر یا تا ۲۰ کیلومتر از یکدیگر) در همخوانی با ساختارها و روندهای لرزه‌ای فعال منطقه تأکید می‌کند.

نتایج این مطالعه با وجود تفاوت اساسی در روش پردازش و در نوع داده‌ها، هم در نتایج مرتبط با معیارها و هم در مباحث تحلیلی مربوط به قابلیت اعتماد به مکان‌یابی رویدادهای لرزه‌ای و پارامترهای وابسته، با مطالعه بندار و

دوردست، الزامی نبوده است. در فواصل دور، امکان دخالت ناهمگنی و ناهمسانگردی محیط انتشار امواج، افزایش و برازش مدل پوسته محلی با ویژگی‌های محیط انتشار و مسیر پرتوها، کاهش می‌یابد. خطاهای میانگین معیارهای باقیمانده زمانی و عمق در شبکه محلی، کمتر نمایان است (جدول ۴).

در کاتالوگ‌های هر دو شبکه و به‌ویژه در IrSC، لرزه‌های مشکوک به انفجار نیز وجود دارند. این تردید در مورد رویدادهایی که در کمتر از ۶ ایستگاه و در ژرفای کم ثبت شده‌اند، بیشتر است. همچنین همزمانی رخداد این لرزه‌ها با فعالیت‌های عمرانی و معدنی روزانه (۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ به وقت جهانی و ۱۰:۳۰ تا ۲۱:۳۰ به وقت محلی) همخوانی داشته است. بررسی مختصات جغرافیایی ۳۵ تا ۳۵/۷ و ۵۳ تا ۵۳/۵ درجه (شکل ۱-الف)، نشان داد که از ۱۲۵ رویداد ثبت شده در شبکه منطقه‌ای در این محدوده زمانی، حداقل ۱۵ تا ۲۰ رویداد، مشکوک هستند. در این محدوده زمانی و مکانی از بین ۱۲۹ رویداد ثبت شده در شبکه محلی، کمتر از ۳ رویداد غیرزمین‌لرزه‌ای وجود دارد. ممکن است در چنین مواردی بررسی بیشتر، بازمینی و اصلاح کاتالوگ، اهمیت و ضرورت داشته باشد.

فاصله رویداد تا ایستگاه ثبت، افزون بر اینکه برخی از ویژگی‌های محیط انتشار امواج لرزه‌ای را نمایندگی می‌کند، تقریب مناسبی از سازگاری مدل به کار رفته برای پوسته با واقعیت محیط انتشار نیز خواهد بود. به عبارت بهتر، نزدیکی ایستگاه‌ها به یکدیگر و توزیع مناسب آن‌ها در یک شبکه (محلی یا منطقه‌ای)، علاوه بر بهبود پوشش آزمون‌تومی رویدادهای درون شبکه، پوشش مسیرهای پرتو (ray coverage) برای محاسبه مدل ساختار سرعتی پوسته را نیز افزایش خواهند داد. در نتیجه برازش واقعیت محیط انتشار امواج لرزه‌ای با مدل پوسته نیز بهبود خواهد یافت. بنابراین به‌خوبی وجه تمایز و نقش این معیار در تعیین محل رویدادهای لرزه‌ای، آشکار است.

واقعیت یکتایی رویدادها در مقیاس محلی، به این مفهوم که هر رویداد ثبت شده در زمان مشابه در هر ایستگاه، تنها

و از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که با همکاری و پشتیبانی در اجرای طرح پژوهشی «بررسی لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساخت در گستره البرز مرکزی با استفاده از زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده در یک شبکه لرزه‌نگاری موقت» زمینه نصب شبکه لرزه‌نگاری محلی متراکم و برداشت داده‌ها را در سال ۱۳۸۵ (۲۰۰۶ میلادی) فراهم کردند، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

یمینی‌فرد، ف. و مرادی، ع.، ۱۳۹۰، بررسی ساختار سرعتی پوسته تهران با استفاده از داده‌های دور و انفجار معادن ثبت شده در شبکه لرزه‌نگاری شهر تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۷، ۳، ۵۹-۶۹.

- Abbassi, A., Nasrabadi, A., Tatar, M., Yaminifard, F., Abbassi, M. R., Hatzfeld, D. and Priestley, K., 2010, Crustal velocity structure in the southern edge of the Central Alborz (Iran): *Journal of Geodynamics*, 49, 68-78.
- Abbassi, A., Tatar, M., Abbassi, M. R. and Yaminifard, F., 2012, Instrumental Seismology of the Eastern part of the Moshafault: *Iranian Journal of Geophysics*, in Farsi text and English Summary, Vol. 6, 1, 128-146.
- Ashtari, M., Hatzfeld, D. and Kamalian, N., 2005, Microseismicity in the region of Tehran: *Tectonophysics*, 395, 193-208.
- Bond'ar, I., Myers, S. C., Engdahl, E. R. and Bergman, E. A., 2004, Epicentre accuracy based on seismic network criteria: *Geophysical Journal International*, 156, 483-496.
- Geiger, L., 1912, Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, (translated from Geiger's 1910 German article): *Bulletin of St. Louis University*, 8(1), 56-71.
- Havskov, J., Ottemöller, L., Trnkoczy, A. and Bormann, P., 2012, Seismic Networks - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ, pp. 1-65. DOI: http://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch8.

همکاران (۲۰۰۴) همخوانی بسیار نزدیکی دارد. پیشنهاد می‌شود در بانک داده (کاتالوگ) مرکز لرزه‌نگاری کشوری علاوه بر دقت و پالایش رویدادهای زمین‌لرزه‌ای از انفجارها و سایر موارد پیش‌گفته، رویدادهایی که بنابر هر دلیلی عمق آنها در در محدوده‌ای ثابت (fixed depth) فرض می‌شود، نشان‌دار شده و همراه با توضیح مناسب کوتاهی در زیرنویس آورده شوند. این موضوع هم در اصلاح و قابلیت اعتماد به بانک داده‌ها و هم در راهنمایی و کاهش نگرانی کاربران داده‌ها مفید خواهد بود.

تشکر و قدردانی

از مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، برای پایگاه داده قابل دسترس <http://irsc.ut.ac.ir>

- Havskov, J. and Ottemöller, L., 2005, SEISAN: The earthquake analysis software for windows, Solaris, Linux and MacOSx, Version 8.1.
- Lienert, B. R. E., Berg, E. and Frazer L. N., 1986, Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares, *Bulletin of Seismological society of America*, Vol. 76, 771-783.
- Lienert, B. R. E., 1991, Report on modifications made to Hypocenter: Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Bergen, Norway.
- Lienert, B. R. E. and Havskov, J., 1995, A computer program for locating earthquakes both locally and globally: *Seismological Research Letters*, 66, 26-36.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., 1975, HYPO71 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes: *United States Geological Survey Open File Report*, 75-311, 113 pp.
- Maggi, A., Priestley, K. and Jackson, J. A., 2002, Focal Depths of Moderate and Large Size Earthquakes in Iran: *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 4: 2-3, 1-10.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., Abbasi, A. and Yaminifard, F., 2012, Microseismicity and seismotectonics around the Moshafault (Central Alborz, Iran): *Tectonophysics*, 544-545, 50-59.

Evaluation of earthquake locations by the two local and regional seismic networks in Central Alborz (Iran)

Abbasi, A.*

Ph.D. in Geophysics-Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 27 Aug 2016, Accepted: 24 Jan 2017)

Summary

The reliable location of earthquakes is one of the most important criteria in the assessments of the seismicity, seismotectonics and seismic hazard analysis and focal depth accuracy has been more questionable. In this study, archived data by local temporary seismological network at the southern edge of Central Alborz (Abbasi et al., 2010; Abbasi et al., 2012; Tatar et al., 2012) and by Iranian Seismological Center (IrSC) at the same times are evaluated. The most basic goal of seismic networks is the determination of accurate earthquake locations (Havskov et al., 2012). The local network (TEFIR) has 47 short period stations that are installed at a spacing of 7 to 15 km and worked at 22 weeks in June to November 2006 in area with 35.4° to 36.1° N and 51.5° to 53° E coordinates which operated in continuous and trigger modes at a sampling rate of 100 up to 125 Hz by International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES). In TEFIR network, the time was calibrated every hour by a GPS receiver connected to each station.

The IrSc network is comprised of 17 telemetries, 1-s short-period stations at a spacing of 35 up to 90 km in region with 35° to 37° N and 50° to 54° E coordinates which are operated in continuous mode at a sampling rate of 50 Hz by Institute of Geophysics, University of Tehran (IGUT).

The location improvement for few events in IrSC catalogue, even if being for the limited area and time period, is one of the main goal. Attention to the seismic network, especially station intervals to modify the standards of location criteria is another aim of this attempt.

To do this study, the events reported in S-files format by the both local and regional network catalogues are relocated with Vp/Vs ratio and one dimension crustal velocity structure (Abbasi et al., 2010). This relocation process has been done in SEISAN software (Havskov and Ottemöller, 2005) and Hypocenter program (Lienart et al., 1986; Lienart, 1991; Lienart and Havskov, 1995). Then relevant location parameters for events that are recorded commonly by the two networks at the same times and different only up to 5 seconds, have been compared carefully.

Average error estimations for the same events at all azimuthal gap (Gap) was up to 1.1 seconds in origin times, from 5.3 to 6.9 kilometers for latitudes and longitudes respectively and more than 15 kilometers for focal depths that recorded by the regional network. These estimated errors for the same events in the local network are less than 0.52 second in origin times, 1.9 kilometers for latitudes and longitudes and up to 5.2 kilometers for focal depths (TEFIR201 and IrSC201 in the table 4). Then 27 anticipated well location events have been selected and analyzed based on $\text{Gap} \leq 180^\circ$ simultaneously from the 201data sets in both relocated catalogues (TEFIR27 and IrSC27).

Location criteria for the events in TEFIR27 data set that have proper mean minimum distances to the recorded stations (Dmin) were being more reliable locations. While the expected improve ment in locations for the IrSC27 data set, despite proper Dmin was not satisfactory.

The relocated same events have shown good relative fitness in location dependent parameters such as root mean square residual timing (RMS), Gap, Dmin, number of stations (NST) and number of phases. Also, this proportionality for calculated latitude and longitude coordinates and origin times, is more than for the calculated depths.

This approaches show that the uncertainties have specific dependencies on the input data files, especially phase readings and phase pickings of the events. As were observed in some seismic records by the regional network at the stations and the reread of the Pg and Sg phases by the local network, some tendency to RMS reduction in the regional operation alone, and intern phases of the far stations to the event locations scheme were being some sources of location errors. Reading the Pn phase instead of the Pg at under the critical distances to receiver station for example less than 180 kilometers, and phase detecting error for few reported events were most erroneous cases.

Obviously, reliable crustal model and Vp/Vs ratio in addition to other appropriate location parameters with a simultaneous decrease RMS causes better location accuracies. Then application of the proper criteria such as Dmin, Gap, NST and corrected phase pickings may improve related location parameters, containing RMS, spatial and time accuracies under the other restrictive network conditions. Among these criteria, Dmin has an important role in determination of the seismological network geometries.

The results of this study, despite the fundamental difference in the processing methods and data with the work of Bond'ar et al. (2004), have a good agreement in the discussed criteria and analytical issues related to reliable locations. Also the consistency of this work may be useful for confidence of the location certainties at least for some earthquake occurred in the studied area at the time span.

Keywords: Earthquake location, same origin time data, Local, Regional.

*Corresponding author:

amabbasi@ut.ac.ir