

بررسی لرزه‌خیزی ناحیه شرق البرز بر پایه مکان‌یابی بهینه زمین‌لرزه‌های رویداده در دو دهه اخیر

وحید ملکی^۱، محمدرضا حاتمی^{۲*} و علی اصغر منتقی^۳

^۱دکتر، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳استادیار، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۱

چکیده

در این مطالعه به بررسی لرزه‌خیزی و تعیین محل دقیق زمین‌لرزه‌های ناحیه شرق البرز در دو دهه اخیر پرداخته می‌شود. داده‌های مورد استفاده، شکل موج لرزه‌ای زمین‌لرزه‌ها هستند. زمان‌های رسید فازهای لرزه‌ای به منظور استفاده در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها در این مطالعه با دقت بالا و به صورت دستی صورت پذیرفته است. به منظور کاهش تأثیرگذاری داده‌های با خطای زیاد و با کیفیت پایین پس از قرائت هر فاز بر اساس کیفیت قرائت آن وزن دهی انجام شده است. قرائت دستی فازهای لرزه‌ای برای ناحیه مورد نظر به فراهم آمدن بانک داده‌ای لرزه‌ای شده است که در آن تعداد ۵۴۶۱ فاز S و ۸۵۲۳ فاز P قرائت شده است که این تعداد در مقایسه با فازهای لرزه‌ای قرائت شده در مرکز لرزه‌نگاری کشوری افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. مکان‌یابی اولیه بر اساس فازهای قرائت شده و وزن دهی اولیه با استفاده از روش غیرخطی احتمالاتی انجام شده است. پس از این مرحله با استفاده از روش اختلاف زمانی دو گانه زمین‌لرزه‌ها مکان‌یابی مجدد شده‌اند. در مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها از ابزار همبستگی عرضی شکل موج زمین‌لرزه‌ها استفاده شده است. همبستگی عرضی برای رویدادهای با شباهت بالای ۷۰٪ در یک پنجره زمانی مشخص برای فاز P و S انجام شده است. در نتیجه استفاده از این فن خطای قرائت فاز برای رویدادهای مشابه به کمترین میزان خود می‌رسد و در نتیجه رویدادهای لرزه‌ای در مکان‌یابی مجدد با دقت بسیار بالاتری نسبت به مکان‌یابی اولیه و همچنین مکان‌یابی تنها بر اساس داده‌های فاز قرائت شده (کاتالوگ) تعیین محل می‌گردند. مقایسه آماری نتایج مکان‌یابی، کاهش چشمگیر خطای تعیین محل و اختلاف زمانی باقی‌مانده در نتایج حل معکوس را نشان می‌دهد. بررسی نتایج همبستگی عرضی شکل موج‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد در این ناحیه زمین‌لرزه‌های با تشابه بسیار بالا و به دفعات زیاد در زمان‌های مختلف به وقوع می‌پیوندد. بررسی وضعیت قرارگیری زمین‌لرزه‌ها بر روی گسل فیروزکوه و ادامه آن گسل‌های چشم و آستانه در مقاطع عرضی عمقی روند قرارگیری زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد. به خط شدگی و تجمع زمین‌لرزه‌ها در نتایج استفاده از ابزار همبستگی عرضی از مکان‌یابی اولیه و استفاده تنها از داده‌های کاتالوگ بیشتر بوده و نشان‌دهنده وجود روندهای مشخص بر روی صفحه گسل‌های موجود است.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی مجدد، روش غیرخطی، اختلاف زمانی دو گانه، همبستگی عرضی، گسل فیروزکوه، شرق البرز.

*نویسنده مسئول: محمدرضا حاتمی

E-mail: mrhatami@ut.ac.ir

۱ - مقدمه

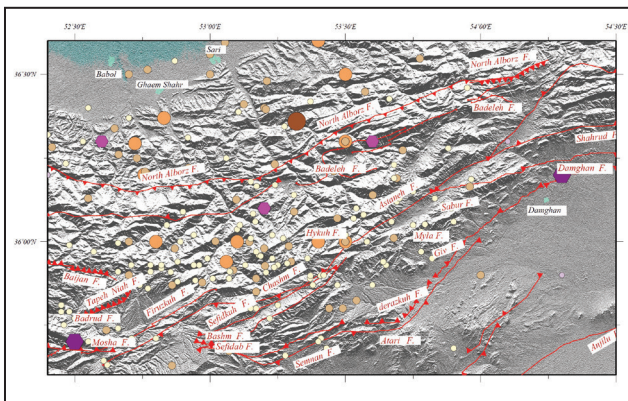
اساس اطلاعات به دست آمده از کاتالوگ فازهای لرزه‌ای بوده است که توسط مراکز لرزه‌نگاری مختلف قرائت می‌شود. از آنجاکه اطلاعات ورودی در هر روش ژئوفیزیکی از جمله مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها پایه و اساس مطالعه را تشکیل می‌دهند، دقت در این بخش بسیار حائز اهمیت بوده و می‌توان آن را از مهم‌ترین بخش‌های یک مطالعه مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها برشمرد. مطالعات زیادی به بررسی فازخوانی و ارائه داده‌های با دقت بالا در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها پرداخته‌اند (Schaff et al., 2004; Waldhauser and Ellsworth, 2000).

علاوه بر اهمیت داده‌های ورودی در مطالعات مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها، انتخاب روش مناسب جهت حل مسئله مکان‌یابی نیز همواره مورد توجه بوده است و از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل ساختار غیر یکنواخت زمین و پیچیدگی‌هایی که در سرعت ساختارهای زمین و مسیر حرکت موج از نقطه آغاز شکستگی تا ایستگاه‌های ثبت کننده، وجود دارد، رابطه میان زمان رسید موج در ایستگاه نسبت به مکان وقوع زمین‌لرزه یک رابطه غیرخطی است. به منظور ساده‌سازی در حل مسئله تعیین محل، روابط مورد استفاده در بیشتر روش‌های تعیین محل خطی شده هستند. اساس بیشتر این روش‌ها و الگوریتم‌ها بر اصولی قرار دارد که (Geiger, 1912) بنیان نهاد. استفاده از روابط خطی شده علاوه بر کاهش دقت به دلیل از دست دادن جملات بالاتر سری تیلور، موجب نارسایی‌هایی در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها، به ویژه در شرایطی نظیر، قرار داشتن زمین‌لرزه در خارج از شبکه می‌شود. (Thurber, 1985) نشان داد در شرایطی که عمق زمین‌لرزه نسبت به فاصله رومرکزی کوچک باشد (در شبکه‌هایی که فاصله میانگین بین ایستگاهی بالا باشد) تعیین عمق به صورت دقیق در روش‌های

ناحیه البرز به دلیل فعالیت لرزه‌خیزی بالا در وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ و همچنین از نظر موقعیت جغرافیایی به لحاظ دربرگیری شهرهای مهم ایران از جمله تهران به عنوان پایتخت، از نگاه زلزله‌شناسی دارای اهمیت بالایی است. یکی از بخش‌های مهم و لرزه‌خیز، بخش شرقی البرز است. این بخش به لحاظ وجود گسل‌های فعال مانند فیروزکوه، چشم و آستانه همواره دارای فعالیت بوده و در تولید رویدادهای لرزه‌ای با بزرگی کوچک و متوسط سهم فراوانی دارد. علاوه بر این، این بخش دربرگیرنده وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی بزرگ و دستگاهی فراوان بوده است. مطالعه لرزه‌خیزی و اطلاع از ساختار هندسی گسل‌ها بر اساس مکان زمین‌لرزه‌ها زمانی محقق می‌گردد که محل زمین‌لرزه‌ها با دقت بالا و خطای کم تعیین گردد. به همین جهت مطالعه تعیین محل زمین‌لرزه‌ها و اهمیت مکان‌یابی دقیق آن‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌های زلزله‌شناسی است. ارائه مکان رومرکزی و به ویژه عمق دقیق زمین‌لرزه‌ها می‌تواند در تفسیر ساختار پیچیده گسل‌ها بسیار مؤثر باشد. علاوه بر این اطلاعات مربوط به هندسه گسل مانند شیب، امتداد و عمق وقوع زمین‌لرزه‌ها بر روی صفحه گسل می‌تواند در ارائه پارامترهای دقیق تر خطر زمین‌لرزه بسیار مفید باشد.

مطالعات بسیار زیادی تاکنون با استفاده از مکان‌یابی مجدد پس‌لرزه‌ها به مطالعه و بررسی پس‌لرزه‌ها پرداخته‌اند از قبیل (Tatar et al., 2007; Huang et al., 2008; Maleki et al., 2013; Hua et al., 2009; Mottaghi et al., 2010; Zhao et al., 2011) در ناحیه مورد بررسی، (Nemati et al., 2012) با استفاده از داده‌های شبکه محلی بر روی گسل‌های فیروزکوه و آستانه به مطالعه خردلرزه‌های این ناحیه پرداخته‌اند. بیشتر مطالعات صورت گرفته در ارتباط با مکان‌یابی و مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها بر

بر اساس مطالعه Jackson et al., (2002) حد شمالی البرز که بخشی از آن در این مطالعه قرار دارد، در امتداد بلوک جنوبی دریای خزر قرار می‌گیرد. بر اساس نظر Jackson et al., (2002) حرکت البرز شرقی را می‌توان نتیجه دو حرکت راندگی گسله خزر و حرکت راستا لغز چپ گرد سامانه گسلی شاهرود با راستای شمال شرقی - جنوب غربی دانست. گسل‌های سامانه گسلی شاهرود و سازوکار حرکتی آنها در سطح در مطالعات مختلف از جمله حسامی‌آذر (۱۳۸۲) و Nemati et al. (2012) شناخته شده‌اند ولی هندسه آنها در عمق شناخته شده نیست. به جز مطالعات اندک این ناحیه پیش‌تر مورد بررسی‌های لرزه‌خیزی قرار نگرفته است. آن‌گونه که از شکل ۲ می‌توان استنباط کرد، زمین‌لرزه‌های دستگاهی قابل توجه در این بخش اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده فعالیت گسل‌های این ناحیه است. با در نظر گرفتن ساختار تکتونیکی شرق البرز و هندسه قرارگیری گسل‌ها به نظر می‌رسد در شرق البرز، یک گره تکتونیکی وجود داشته باشد. تمرکز اصلی این گره محل تلاقی گسل‌های مشا و گسل شمال تهران است. در ادامه این گره تکتونیکی به سمت شرق ناحیه فیروزکوه قرار دارد که دارای بیشترین آمار وقوع زمین‌لرزه در ناحیه البرز است. این ناحیه یکی از مهم‌ترین نواحی فعال و لرزه‌خیز البرز است که در آن زمین‌لرزه‌های تاریخی و ثبت دستگاهی بسیاری به وقوع پیوسته‌اند.



شکل ۲- نقشه لرزه‌خیزی ناحیه البرز شرقی. زمین‌لرزه‌های تاریخی (ثبت شده قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی) با چندضلعی و زمین‌لرزه‌های دستگاهی (ثبت شده پس از سال ۱۹۰۰ میلادی) با دایره نشان داده شده‌اند. نقشه گسل‌ها بر اساس مطالعه حسامی و همکاران (۱۳۸۲) است.

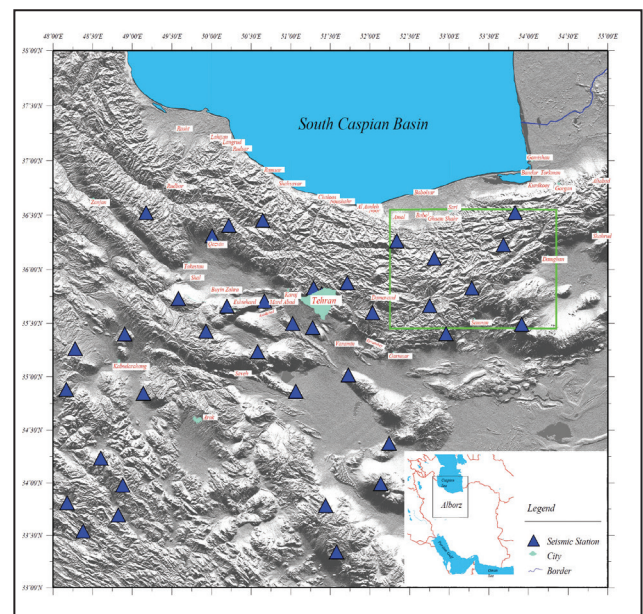
دو زمین‌لرزه تاریخی با بزرگی فراوان در این ناحیه به وقوع پیوسته‌اند. زمین‌لرزه سال ۲۳۵ خورشیدی (۸۵۶ میلادی)، پهنه گسترده ایران را به لرزه درآورد. (Ambraseys and Melville, 1982) مرکز این زمین‌لرزه دقیقاً در زیر شهر دامغان قرار داشته است که برجای گذاشتن حدود دویست هزار کشته، تاکنون پس از گذشت بیش از هزار سال از آن فاجعه، پنجمین زمین‌لرزه کشنده در تاریخ مدون بشر به شمار می‌آید. این زمین‌لرزه را بر اساس کتاب‌های تاریخی می‌توان نخستین زمین‌لرزه مرگبار ایران دانست. وجود این زمین‌لرزه به اهمیت لرزه‌خیزی و مطالعه این ناحیه می‌افزاید. دیگر زمین‌لرزه تاریخی ناحیه مورد بررسی در غربی‌ترین بخش ناحیه و بر روی بخش شرقی گسل مشاء و مربوط به زمین‌لرزه ۲۷ مارس ۱۸۳۰ میلادی با بزرگی ۷/۱ است (Ambraseys and Melville, 1982). این زمین‌لرزه درواقع آخرین زلزله بزرگ ناحیه شهر تهران با بزرگی بیش از هفت است.

در غرب روستای آستانه (واقع در شمال باختری شهر دامغان) و دره رودخانه آستانه، دو گسله موازی و کنار هم با راستای شمال خاوری - جنوب باختری دیده می‌شوند که در نزدیکی ۱۰ کیلومتری جنوب غربی آستانه، رسوبات آبرفتی کواترن را به‌روشنی بریده و همراه با آبراهه‌های پهنه، به شکل چپ‌بر (left - lateral) جابه‌جا نموده است (بربریان و همکاران، ۱۳۷۱). گسل آستانه به دلیل نزدیکی با مرز جنوبی البرز و همچنین وجود رسوبات آبرفتی کواترن در کنار آن،

خطی شده امکان‌پذیر نیست و در این موارد استفاده از جمله بالاتر (غیرخطی) می‌تواند نارسایی به وجود آمده را بهبود بخشد. مبانی نظری روش تعیین محل غیرخطی احتمالاتی توسط (Tarantola and Valette, 1982) مطرح شد و سپس توسط (Tarantola, 1987) مورد بازبینی کلی قرار گرفت. روش غیرخطی تعیین محل زمین‌لرزه‌ها بر مبنای تئوری حل معکوس احتمالاتی (Tarantola and Valette, 1982) و (Tarantola, 1987) توسط Lomax et al. (2000) معرفی گردید که در این مطالعه نیز از این روش استفاده شده است. علاوه بر روش‌های مکان‌یابی ارائه مکان مطلق زمین‌لرزه، به‌کارگیری روش‌های نسبی مکان‌یابی در کاهش خطای مکان زمین‌لرزه‌ها بسیار مؤثر است. (Waldhauser and Ellsworth, 2000) روش مکان‌یابی نسبی را در برنامه HypoDD بر اساس داده‌های حاصل از همبستگی عرضی و کاتالوگ به کار گرفتند. اولین شرط استفاده از این روش این است که مکان زمین‌لرزه‌ها به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک باشد به‌طوری‌که بتوان فرض کرد مسیر حرکت امواج لرزه‌ای از چشمه به ایستگاه یکسان است. در این مطالعه با توجه به فاصله کم رویدادهای مورد بررسی و تشابه شکل موج رویدادها که عمدتاً پس‌لرزه‌های ثبت شده هستند، از این روش استفاده گردیده است. علاوه بر اهمیت استفاده از روش‌های نوین با کارایی مناسب در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها، کیفیت داده‌های مورد استفاده شامل زمان رسید فازهای لرزه‌ای از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در بسیاری از مطالعات مکان‌یابی و توموگرافی لرزه‌ای، این مهم مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. یکی از ویژگی‌های این مطالعه بازخوانی اطلاعات لرزه‌ای از شکل موج‌های ثبت شده و بهبود بانک داده به منظور مکان‌یابی زمین‌لرزه‌هاست.

۲- وضعیت تکتونیکی ناحیه مورد مطالعه

ناحیه مورد بررسی در بخش شرقی رشته کوه البرز واقع شده است. این ناحیه بر اساس تقسیمات لرزه‌زمین‌ساختی (Mirzaei et al., 1998)، بخشی از ایالت لرزه زمین ساختی البرز-آذربایجان است که به‌عنوان البرز مرکزی شناخته می‌شود. بخش البرز پهنه‌ای زلزله‌خیز است که بخش‌های شمالی ایران را در برمی‌گیرد. رشته کوه البرز از شمال به فرونشست دریای خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی منتهی می‌گردد. نقشه تپوگرافی ناحیه البرز و جایگاه بخش مورد مطالعه (کادر سبز رنگ) در آن به همراه ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه پراکندگی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مورد استفاده بر پایه تپوگرافی در ناحیه البرز. ناحیه مورد مطالعه با کادر سبز رنگ نشان داده شده است.

آنها دارای تشابه بالا باشد. اثر چشمه را می‌توان به سازوکار گسل مسبب رویداد لرزه‌ای نسبت داد که در نتیجه متفاوت بودن آن برای دو رویداد می‌تواند بر روی شکل موج ثبت شده تأثیر به سزایی داشته باشد. همچنین مسیر حرکت یکسان برای دو رویداد تنها در صورتی امکان پذیر است که دو رویداد لرزه‌ای ثبت شده به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک بوده باشند که در این صورت مسیر حرکت آن‌ها از چشمه به ایستگاه لرزه‌نگار دارای شباهت بالایی باشد. به این ترتیب ابزار همبستگی عرضی شکل موج لرزه‌ای می‌تواند تضمین کننده ارتباط دو رویداد با فاصله کم به یکدیگر باشد. علاوه بر این مهم، همبستگی عرضی در کاهش عدم قطعیت فازخوانی بسیار مؤثر است و خطای فازخوانی را تا حد بسیار بالایی به صورت نسبی کاهش می‌دهد.

۴ - داده‌های مورد استفاده

به منظور افزایش دقت در قرائت فازهای لرزه‌ای و همچنین استفاده از تکنیک همبستگی عرضی شکل موج زمین لرزه‌ها، داده‌های شکل موج لرزه‌ای زمین لرزه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و فازهای لرزه‌ای بازخوانی شده‌اند. داده‌های مورد استفاده از شبکه لرزه‌نگاری کشوری استفاده شده‌اند. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری کوتاه دوره مجهز به لرزه‌نگار SS1 (با فرکانس ویژه یک هرتز) است. همچنین ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با باند متوسط مجهز به لرزه‌نگارهای Trillium-40s. شکل موج‌های تعداد ۱۰۵۰ زمین لرزه به وقوع پیوسته با بزرگی $M_n > 2$ از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ مورد ارزیابی قرار گرفته است. شایان ذکر است به علت تعداد کم زمین لرزه‌های ثبت شده در مرکز لرزه‌نگاری قبل از سال ۲۰۰۶ که به علت عدم پوشش کافی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری بوده است، از سال ۱۹۹۶ الی ۲۰۰۶ رویدادهای با بزرگی $M_n > 1.0$ نیز به بانک داده این مطالعه افزوده شده است. انتخاب مدل سرعتی در هر مطالعه مکان‌یابی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعه محسوب می‌شود. مدل سرعتی غیر مناسب باعث ورود خطاهای سامانمند به نتایج شده و نتیجه نهائی مکان‌یابی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه بر اساس داده‌های زمان رسید قرائت شده مدل سرعتی با استفاده از برنامه (VELEST) (Kissling et al., 1994) انجام گردید اما با توجه به گستردگی شبکه ایستگاهی نسبت به موقعیت زمین لرزه‌ها نتایج آن مورد استفاده قرار نگیرد و استفاده از مدل‌های سرعتی به دست آمده از مطالعات گذشته در این ناحیه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مکان‌یابی‌های اولیه صورت گرفته با مدل‌های سرعتی مختلف از جمله (Ashtari Jafari, 2005) و (Abbassi et al., 2010) مشخص گردید که مدل سرعتی (Abbassi et al., 2010) دارای انطباق بیشتری با داده‌های لرزه‌ای این مطالعه است و مقادیر اختلاف زمانی (RMS) کمتری نسبت به مدل (Ashtari Jafari, 2005) دارد. به همین دلیل مدل سرعتی (Abbassi et al., 2010) در مکان‌یابی اولیه و مکان‌یابی مجدد مورد استفاده قرار گرفت.

۵ - قرائت مجدد فاز P و فاز S (P and S phase picking)

در این مطالعه قرائت مجدد برای همه داده‌های مورد استفاده به صورت دستی صورت پذیرفته است. اولین قدم در قرائت مجدد دستی (manual picking) فازهای لرزه‌ای، پالایه کردن رکوردها به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه در رکورد لرزه‌ای است. باین حال پالایه کردن یک رکورد لرزه‌ای می‌تواند باعث صدمه به رکورد و تغییر در شکل موجک (wavelet) و همچنین شیف فاز (phase shift) رکورد گردد. بنابراین انتخاب نوع پالایه بر روی رکوردهای لرزه‌ای مسئله بسیار مهمی است. در این مطالعه رکوردهای لرزه‌ای با پالایه بالا گذر ۰/۷ هرتز مرتبه دوم باترورت پالایه شده‌اند. این پالایه تغییرات کوچکی بر روی رکورد ایجاد می‌کند اما می‌توان از عدم شیف فاز (phase shift) مطمئن بود. استفاده از اطلاعات اولیه در کاتالوگ‌های موجود، مانند مکان و زمان وقوع زمین لرزه و محل اولیه فاز قرائت شده است. به این منظور همه داده‌های خام شکل موج لرزه‌ای با اطلاعات موجود در کاتالوگ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، (IRSC)، منطبق شده و فازهای مدل‌سازی شده برای موج P به داده‌ها افزوده شده است. آگاهی از کیفیت فاز لرزه‌ای قرائت شده

به روشنی جنبش جوان کواترن را نشان می‌دهد. درازای شناخته شده گسل آستانه بیش از ۷۵ کیلومتر بوده و سازوکار آن راندگی با مؤلفه راستا لغز چپ‌بر است. (بربریان و همکاران، ۱۳۷۵) امکان دارد خرابی دژ فولاد محله به سبب جنبش گسل آستانه روی داده باشد. همچنین ممکن است جنبش این گسل سبب رویداد زمین لرزه ۲۲ دسامبر ۸۵۶ میلادی کوموس با بزرگی $M_s = 7.9$ باشد (بربریان و همکاران، ۱۳۷۵).

۳ - روش انجام مطالعه

در این مطالعه از دو روش تعیین محل زمین لرزه استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از داده‌های بازخوانی شده که از این مطالعه به دست آمده‌اند یک مکان‌یابی اولیه بر اساس روش غیرخطی احتمالاتی انجام گرفته است. پس از این مرحله با استفاده از تکنیک همبستگی عرضی شکل موج زمین لرزه‌ها، رویدادهای با تشابه بالا شناسایی و دسته‌بندی شده و بر این اساس مکان‌یابی نسبی برای زمین لرزه‌ها ارائه می‌گردد. روش استفاده شده در این مطالعه برای تعیین محل اولیه زمین لرزه‌ها بر اساس حل معکوس احتمالاتی (Tarantola and Valette, 1982) و (Tarantola, 1987) است. برنامه غیرخطی تعیین محل زمین لرزه‌ها بر اساس حل معکوس احتمالاتی توسط (Lomax et al., 2000) تدوین شده است. اساس روش احتمالاتی، ساختن تابع چگالی احتمال (Probability Density Function, PDF) بر اساس کمینه کردن عدم تطابق میان زمان رسیدهای مشاهده شده و محاسبه شده از یک مدل سرعتی اولیه (پیش فرض) است. محاسبه نقاط PDF برای تمام زمان وقوع‌های ممکن صورت می‌گیرد و در نتیجه مقدار احتمال محاسبه شده تنها برای مکان کانونی زمین لرزه و مستقل از زمان وقوع آن است. فرض اساسی در روش غیرخطی آن است که عدم قطعیت-های داده‌های مشاهده شده از شکل زنگوله‌ای (Gaussian) تبعیت کنند و دارای توزیع یکنواخت در سراسر داده‌ها باشند. یافتن پاسخ کلی برای این مسئله نیاز به ارزیابی دقیق تمام نقاط پراکنده PDF در سراسر شبکه دارد و با استفاده از یک الگوریتم جستجو به نام اوکت تری (oct tree Importance sampling) (Lomax et al., 2000) می‌توان به این مهم دست یافت (Maleki et al., 2013).

پس از آنکه رویدادهای لرزه‌ای با استفاده از داده‌های زمان رسید قرائت شده در این مطالعه مکان‌یابی اولیه شدند، به منظور بهبود نتایج مکان‌یابی با استفاده روش اختلاف زمانی دو گانه (Waldhauser and Ellsworth, 2000) زمین لرزه‌ها مکان‌یابی مجدد می‌شوند. روش اختلاف زمانی دو گانه در صورتی می‌تواند کارایی مناسب را داشته باشد که رویدادهای مورد بررسی در فاصله نزدیک به هم مشخص گردند. ابزار همبستگی عرضی (cross correlation) با تشابه سنجی میان شکل موج زمین لرزه‌ها می‌تواند رویدادهای با شباهت زیاد را مشخص کند. همبستگی عرضی شکل موج زمین لرزه‌ها با محاسبه ضرایب شباهت دو شکل موج لرزه‌ای (از دو زمین لرزه رکورد شده در یک ایستگاه) اطلاعات مفیدی را از وضعیت دو زمین لرزه نسبت به یکدیگر به دست می‌دهد. شباهت بالای دو زمین لرزه نسبت به یکدیگر علاوه بر اینکه می‌تواند مشخص کننده مسیر مشابه طی شده از چشمه تا ایستگاه لرزه‌نگاری باشد می‌تواند بیانگر ارتباط نزدیک مکانیسم دو زمین لرزه و در نتیجه آن نسبت دادن آن‌ها به یک گسل و چشمه لرزه‌ای باشد. یافتن زمین لرزه‌هایی با همبستگی لرزه زمین ساختی می‌تواند مشکلات خوشه‌بندی زمین لرزه‌ها جهت به کارگیری روش اختلاف زمانی دو گانه را مرتفع سازد. به منظور یافتن ارتباط میان زمین لرزه‌ها و نحوه توزیع فضایی آن‌ها و همچنین یافتن همبستگی میان زمین لرزه‌ها در یک خوشه زمین لرزه روش‌های زیادی در حوزه زمان و فرکانس به کار گرفته شده‌اند (Nakamura, 1978; Fre'chet, 1985). همبستگی عرضی مورد استفاده در این مطالعه به طور مستقیم در حوزه زمان صورت می‌گیرد. روش مورد استفاده در این مطالعه توسط (Deichmann et al., 1992) به منظور تعیین میزان شباهت پس لرزه‌ها معرفی گردید. شکل موج یک رویداد لرزه‌ای متأثر از فاکتورهای مختلفی از جمله اثر چشمه، مسیر حرکت، اثر ساختگاه و اثر دستگاهی است. دو رویداد لرزه‌ای زمانی می‌تواند با تشابه بالا در یک ایستگاه ثبت گردند که دو اثر چشمه و مسیر حرکت

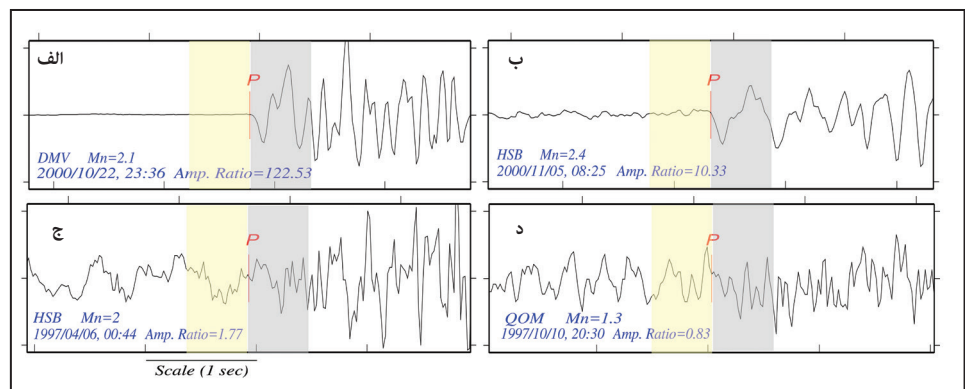
موردنظر می‌گردد. همچنین در تعداد قابل توجهی از داده‌های شکل موج به علت پیچیدگی‌های رکود مانند سطح نوفه بالای رکورد، نوع فاز به اشتباه مشخص گردیده است. یکی دیگر از مشکلات موجود در کاتالوگ زمان-رسید مرکز لرزه‌نگاری کشوری، تشخیص اشتباه اولین رسید (first break) برای رکوردهای با سطح نوفه بالا است. در این مطالعه با مدل‌سازی زمان رسید فازهای لرزه‌ای امکان تشخیص فاز P با قطعیت بالا میسر گردیده است. تعداد فازهای قرائت‌شده در کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای این دسته از زمین‌لرزه‌ها که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند برای فازهای P و S به ترتیب ۲۱۳۵ و در این مطالعه ۷۲۳۱ است. اما قرائت دستی فازهای لرزه‌ای منجر به فراهم آمدن بانک داده لرزه‌ای شده است که در آن تعداد ۵۴۶۱ فاز S و ۸۵۲۳ فاز P قرائت شده است افزایش تعداد فازهای لرزه‌ای به‌ویژه فاز S می‌تواند باعث کاهش خطای مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها گردد.

در قرائت فاز S همه نکاتی که برای فاز P گفته شد باید مورد توجه قرار گیرد. اما با توجه به ثانویه بودن فاز S در رکوردهای لرزه‌ای و انطباق امواج کدای P و فازهای تبدیلی بر روی فاز S، تشخیص زمان ورود این فاز بر روی رکورد بسیار مشکل و در بسیاری از موارد غیرممکن است. یکی از روش‌های افزایش دقت در تشخیص ورود فاز S استفاده از اطلاعات مکان زمین‌لرزه بر اساس مکان‌یابی اولیه صورت گرفته در کاتالوگ است. در این مطالعه با چرخش مؤلفه‌های افقی حول محور قائم و تبدیل مؤلفه‌های افقی به مماسی و عمودی، ورود فاز S با وضوح بسیار بالاتری قابل مشاهده است. شکل ۴ چرخش مؤلفه‌های افقی برای تعدادی از رکوردهای این ناحیه را نشان می‌دهد. و چرخش مؤلفه‌های شرقی و شمالی (ZNE) به مؤلفه‌های شعاعی و مماسی (ZRT) محل ورود فاز S بر روی مؤلفه مماسی با وضوح بیشتری قابل شناسایی است و زمان رسید این فاز با دقت بیشتری مشخص می‌شود.

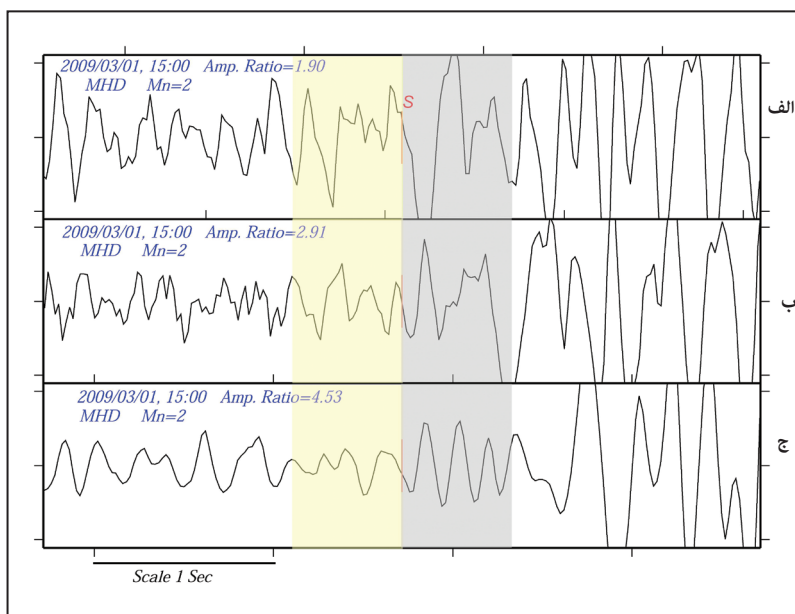
به بهبود کیفیت مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها کمک زیادی می‌کند. وزن دهی به فازهای قرائت‌شده موجب می‌شود داده‌هایی که نسبت سیگنال به نوفه آن‌ها پایین است سهم کمتری در نتیجه نهایی مکان‌یابی ایفا کنند. در این مطالعه بر اساس مطالعه (Baer and Kradolfer, 1987) وزن‌دار نمودن داده‌ها را بر اساس نسبت بین دامنه موج P در یک پنجره زمانی معین به بزرگ‌ترین دامنه لرزه‌نگار قبل از قرائت موج P تعیین شده است. در این روش نسبت دامنه موج لرزه‌ای حول فاز P و S در یک پنجره زمانی قبل و بعد از فاز موردنظر محاسبه می‌شود و به‌عنوان شاخصی از کیفیت قرائت فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. پنجره زمانی موردنظر برای فاز P ۰/۵ ثانیه و برای فاز S ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این مطالعه با استفاده از ترکیب فاز خوانی خودکار و مقایسه آن با فاز قرائت‌شده در کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری، محتمل‌ترین زمان رسید برای فاز موردنظر انتخاب می‌شود و نوع فاز مانند، Pn، Pg، Sg، و Sn با استفاده از مدل‌سازی فازها بر اساس مکان اولیه ارائه‌شده در کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری و یک مدل سرعتی بهینه برای فازهای P و S انتخاب می‌شود. شکل ۳ نحوه قرائت و وزن‌دار کردن فاز P را برای چهار دسته از رکوردهای (با کیفیت‌های مختلف) ناحیه مورد بررسی نشان می‌دهد. یا توجه به این روش کیفیت فازهای لرزه‌ای (P و S) به ۴ دسته تقسیم‌بندی شده و در مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

استفاده از زمان وقوع زمین‌لرزه بر روی رکورد لرزه‌ای (seismic record) احتمال ورود داده‌های پرت (outliers) را کاهش می‌دهد. یکی از مشکلات قابل بررسی در داده‌های زلزله وجود دو رویداد بر روی رکورد لرزه‌ای است که باعث وقوع اشتباه در تشخیص سیگنال زلزله‌ها است. استفاده از اطلاعات زمان وقوع زمین‌لرزه بر روی رکورد در حین قرائت مجدد فاز لرزه‌ای، باعث تفکیک صحیح شکل موج‌های رویداد

شکل ۳- نحوه وزن‌دهی به فازهای قرائت‌شده بر اساس نسبت دامنه پس از ورودی موج به نسبت دامنه قبل از ورود موج در یک پنجره به طول نیم ثانیه. نسبت دامنه‌ها بر روی هر رکورد نشان داده شده است. مقدار نسبت دامنه بعد از قرائت فاز به قبل از آن بر روی هر رکورد مشخص شده است. پنجره‌های الف، ب، ج و د نسبت دامنه برای کیفیت‌های مختلف طبقه‌بندی‌شده در وزن دهی را نشان می‌دهند.



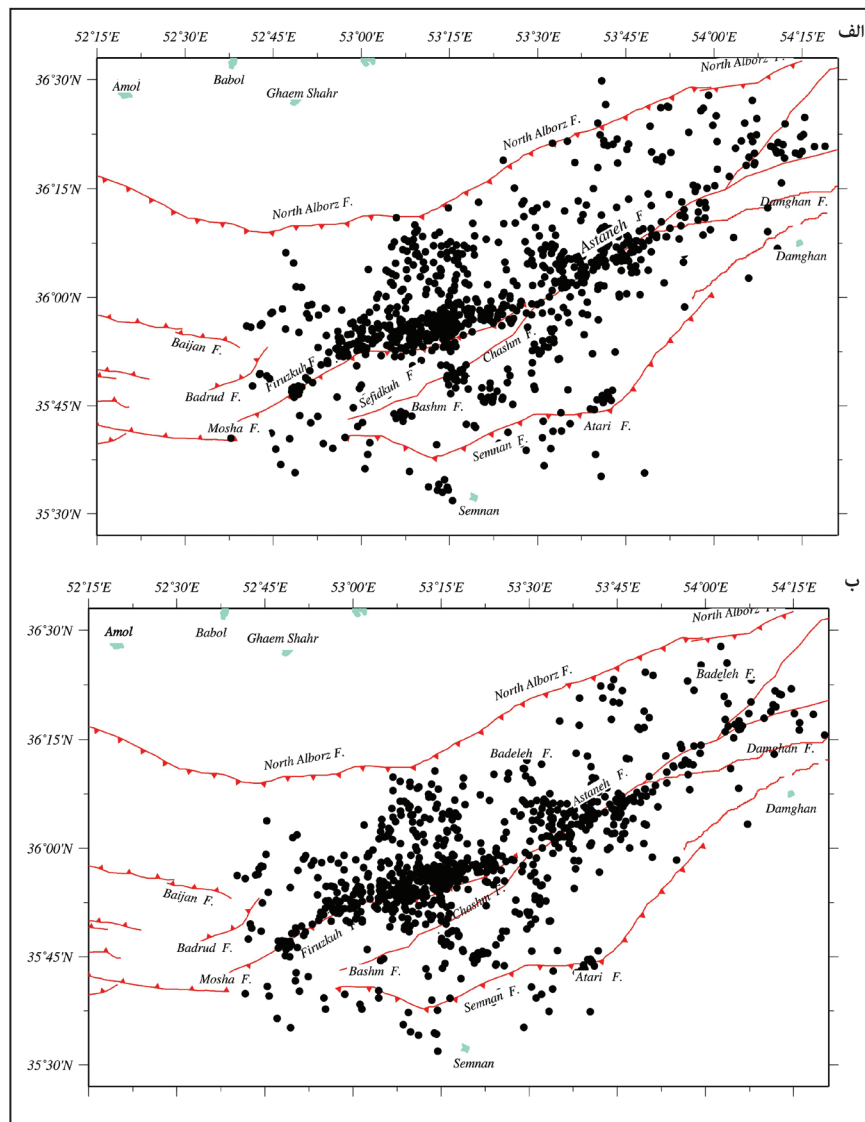
شکل ۴- روش قرائت فاز S در این مطالعه با استفاده از چرخش مؤلفه‌های افقی حول مؤلفه قائم در راستای مسیر ورود موج به ایستگاه. پنجره‌های الف و ب مؤلفه‌های شمالی و شرقی هستند و پنجره ج، مؤلفه مماسی حاصل از چرخش مؤلفه‌های افقی است.



۶- نتایج مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های ناحیه مورد بررسی

روش غیرخطی را با مکان‌یابی صورت گرفته در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها که توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری صورت گرفته است را مقایسه می‌کند. در نگاه کلی میزان تجمع و به خط شدگی مکان رومرکزی زمین‌لرزه‌ها در مکان‌یابی صورت گرفته با استفاده از روش غیرخطی و اختلاف زمانی دوگانه نسبت به مکان ارائه شده برای زمین‌لرزه‌ها در کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری بیشتر شده است و با خط اثر گسل‌های مشخص شده سازگاری بیشتری دارد. پس از ارائه مکان‌یابی اولیه مناسب برای همه زمین‌لرزه‌ها تکنیک همبستگی عرضی به منظور تشخیص رویدادهای مشابه استفاده شده است. در این مرحله رویدادهایی که شباهت آن‌ها بیش از ۷۰٪ مشخص شده است و حداقل در ۴ ایستگاه این شباهت مشاهده شده باشد انتخاب گردیدند.

داده‌های شکل موج ۱۰۵۰ زمین‌لرزه رخ داده در ناحیه مورد بررسی از سال ۱۹۹۶ الی ۲۰۱۶ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و فازهای لرزه‌ای آن‌ها بازخوانی شد. پس از این مرحله بر اساس روش ارائه شده در بخش قبل به هر فاز وزن متناسب با کیفیت آن نسبت داده شد و با استفاده از روش غیرخطی برای زمین‌لرزه‌ها مکان‌یابی اولیه صورت گرفته است. نحوه وزن دهی داده‌ها در برنامه مکان‌یابی غیرخطی و اختلاف زمانی دوگانه بر سه مبنای فاصله ایستگاهی، مقدار زمان باقی‌مانده و وزن اولیه داده‌ها صورت می‌گیرد. در این مطالعه تصحیح خطای ایستگاهی (که متاثر از اثر ساختگاه زیر هر ایستگاه لرزه‌نگاری است) بر اساس میانگین زمان باقی‌مانده هر ایستگاه صورت گرفته است و مکان‌یابی نهایی بر اساس حذف این میانگین زمانی صورت گرفته است. شکل ۵ نتایج مکان‌یابی اولیه بر اساس

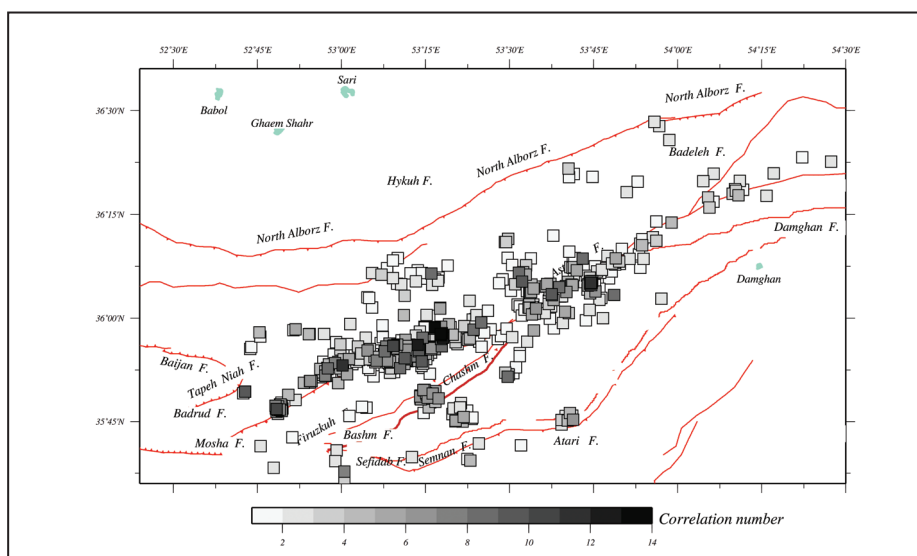
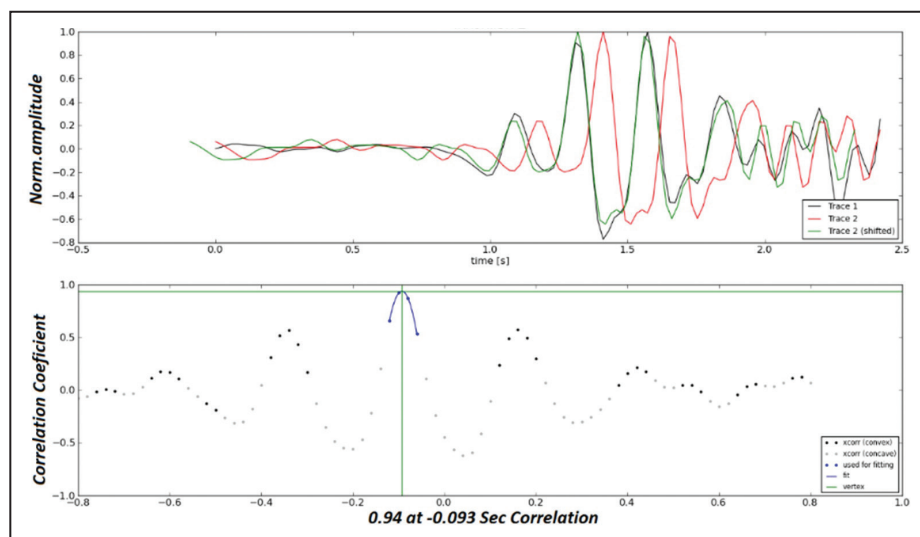


شکل ۵- مکان‌یابی صورت گرفته برای رویدادهای ناحیه مورد مطالعه. (الف) مکان‌یابی گزارش شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری؛ (ب) مکان‌یابی نهایی بر اساس دو روش غیرخطی احتمالاتی و اختلاف زمانی دوگانه (استفاده از داده‌های همبستگی عرضی) در این مطالعه.

هرگز استفاده شده است. شکل ۷ وقوع زمین‌لرزه‌های مشابه برحسب تعداد تکرار آنها با شباهت بالای ۷۰٪ را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار تشابه میان زمین‌لرزه‌ها در این ناحیه، ثبت ۱۴ تشابه بوده است که بر مبنای تشابه بالای ۷۰٪ محاسبه گردیده است. شکل ۷ از آن جهت می‌تواند بسیار مهم باشد که مکان‌یابی ارائه شده برای رویدادهای لرزه‌ای در آن با استفاده از روش اختلاف زمانی دوگانه

شکل ۶ نحوه محاسبه ضرایب شباهت میان دو شکل موج در یک پنجره زمانی را بر اساس روش ارائه شده توسط (Deichmann, 1992) نشان می‌دهد. همچنین استفاده از پالایه در حذف نوفه‌ها و به دست آوردن شباهت سیگنال می‌تواند نتایج واقعی‌تری از شباهت دو سیگنال لرزه‌ای را بدهد. در این مطالعه با توجه به فواصل بین ایستگاهی و توزیع زمین‌لرزه‌ها در شبکه ایستگاهی از پالایه میان‌گذر ۱-۱۰

شکل ۶- محاسبه ضرایب کرولیشن برای دو رکورد زمین‌لرزه در ایستگاه سفیدآب (SFB). شباهت سنجی پیرامون فاز P. پنجره بالایی وضعیت دو رکورد را نشان می‌دهد و پنجره پایینی نحوه محاسبه ضرایب تابع شباهت را به تصویر می‌کشد. میزان شباهت برای دو رکورد ۹۴ درصد به‌دست آمده است.

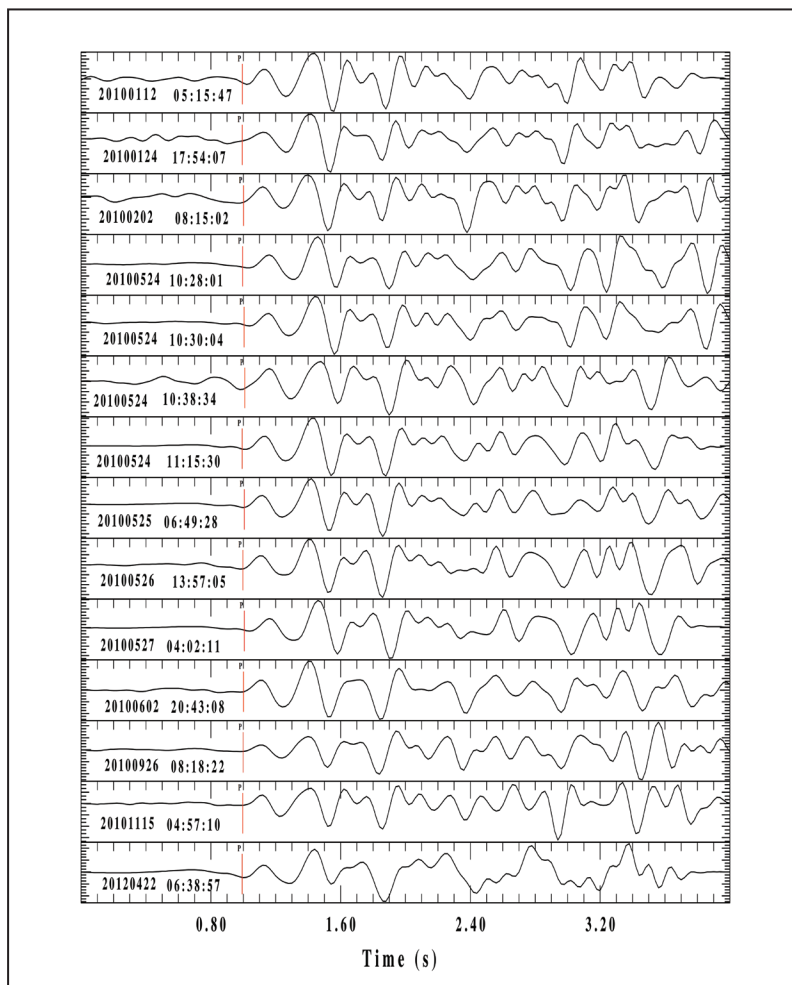


شکل ۷- نقشه مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها بر اساس داده‌های همبستگی عرضی و روش اختلاف زمانی دو گانه. میزان تکرار زمین‌لرزه‌های با شباهت بالای ۷۰ درصد در ناحیه مورد بررسی با طیف رنگی سیاه و سفید نشان داده شده است. بیشترین تکرار یک زمین‌لرزه در این ناحیه ۱۴ تکرار برای یکی از رویدادهای گسل چشم بوده است.

می‌دهد میانگین خطای رومرکزی از $3/6$ کیلومتر به $1/8$ کیلومتر کاهش یافته است. خطای تعیین عمق نیز بر اساس نتایج به‌دست آمده از $4/9$ کیلومتر به $3/4$ کاهش یافته است. همچنین استفاده از داده‌های همبستگی عرضی شکل موج زمین‌لرزه‌ها خطای مکان‌یابی را در رومرکز از $1/8$ به $1/6$ کیلومتر و در تعیین عمق زمین‌لرزه‌ها از $3/4$ به $2/5$ کیلومتر کاهش داده است. در هیستوگرام (ز) مقایسه مقدار زمان باقی مانده RMS نیز نشان دهنده کاهش قابل توجه در روش اختلاف زمانی دو گانه و استفاده از داده‌های همبستگی عرضی نسبت به مکان‌یابی اولیه (به روش غیر خطی) است. مقادیر شکاف آزمون‌ی و فاصله نزدیک‌ترین ایستگاه تا رومرکز زمین لرزه‌ها در نمودارهای ح و ط در شکل ۹ نشان داده شده است. در استفاده از روش اختلاف زمانی دو گانه و داده‌های همبستگی عرضی از داده‌هایی استفاده شده است که پوشش ایستگاهی مناسب داشته و شکاف آزمون‌ی آنها کمتر از ۱۸۰ درجه باشد. در نهایت مجموعه زمین‌لرزه‌ها با ترکیب دو نوع داده مختلف (کاتالوگ و همبستگی عرضی) مکان‌یابی شده‌اند و نتیجه به‌دست‌آمده بر روی رومرکز و عمق در شکل ۱۰ آمده است. در استفاده از داده‌های همبستگی عرضی به خط شدگی زمین‌لرزه‌ها در راستای شمال-جنوب با وضوح زیادی مشخص گردیده است (این روندها در شکل ۷ نیز با وضوح بالا قابل تشخیص است). این روند عمود بر روند گسل‌های منطقه است و می‌تواند شاهد وجود یک تکنیک پیچیده در ناحیه مورد مطالعه باشد.

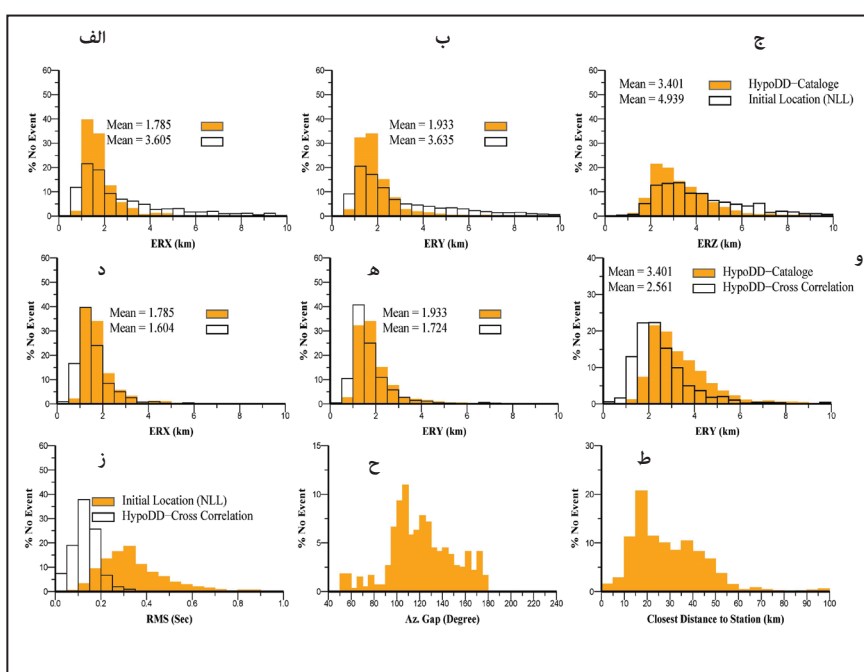
بر مبنای ارتباط مبتنی بر تشابه زمین‌لرزه‌ها بوده و ازین نظر مکان‌یابی نسبی ارائه شده برای آنها دارای کمترین عدم قطعیت است. روندهای قابل مشاهده در شکل ۷ تأیید کننده تکنیک پیچیده ناحیه البرز شرقی است. در این شکل دو روند عمود بر روند گسلی فیروزکوه و چشم مشاهده می‌شود که در مطالعات گذشته در این ناحیه به وجود آنها اشاره ای نشده است.

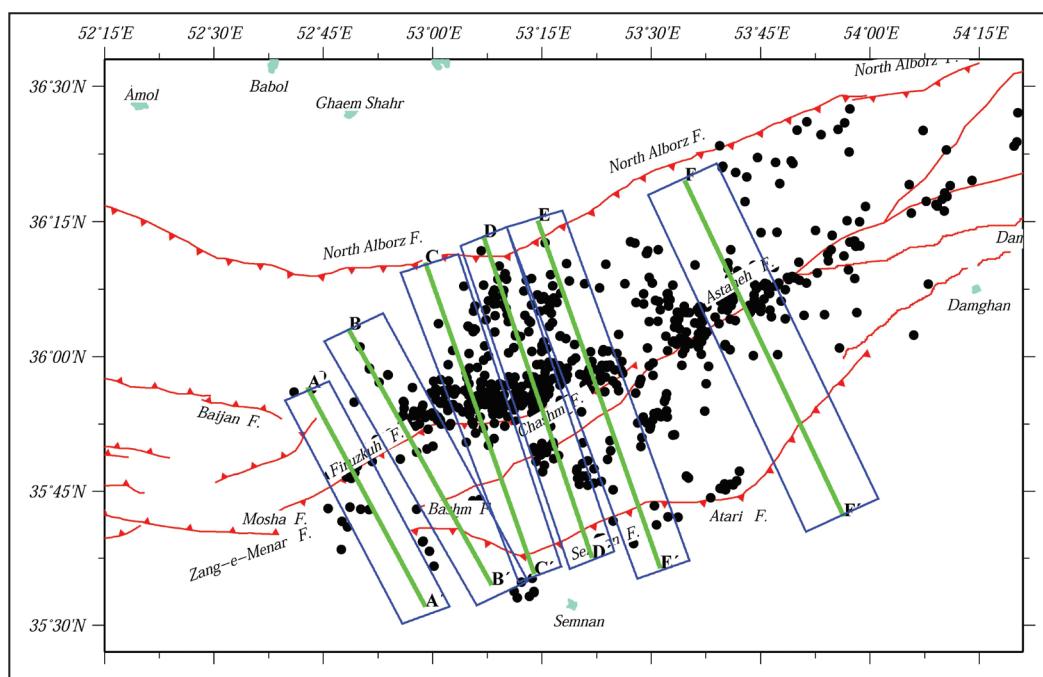
شکل ۸ شکل موج‌های ۱۴ رویداد مشابه (تشابه بالای ۷۰٪) را در یک پنجره زمانی اطراف فاز P را که در ایستگاه گلوگاه (GLO) به ثبت رسیده است را نشان می‌دهد. در شکل شماره ۸، ۱۴ رکورد مشخص شده با تشابه بالای ۷۰٪ را نشان می‌دهد. رویدادهای مربوط به گسل چشم هستند. با استفاده از روش اختلاف زمانی و تکنیک همبستگی عرضی تعداد ۹۸۰ رویداد لرزه‌ای برای ناحیه مورد مطالعه مکان‌یابی مجدد شده است که خطای مکان‌یابی آنها عموماً کمتر از دو کیلومتر تخمین زده شده است. در شکل ۹ نمودارهای الف، ب و ج مقایسه خطای مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها در مکان‌یابی اولیه به روش غیر خطی و اختلاف زمانی دو گانه بر اساس داده‌های همبستگی عرضی را نشان می‌دهند. خطای مکان‌یابی به مقدار قابل توجهی در روش اختلاف زمانی دو گانه نسبت به مکان‌یابی اولیه و داده‌های کاتالوگ کاهش یافته است. نتایج به‌دست آمده از مقایسه خطای مکان‌یابی در روش غیر خطی (مکان‌یابی اولیه در این مطالعه) نسبت به روش اختلاف زمانی دو گانه (داده‌های کاتالوگ) نشان



شکل ۸- شکل موج زمین لرزه های تکرارشونده با شباهت بالای ۷۰ درصد در ناحیه مورد بررسی. رویدادها مربوط به گسل چشم هستند. رکوردهای مشابه در ایستگاه گلوگاه (GLO) ثبت شده اند.

شکل ۹- نمودار آماری نتایج به دست آمده در این مطالعه. نمودارهای الف، ب و ج، مقایسه خطای به ترتیب راستای طول جغرافیای، عرض جغرافیایی و عمق زمین لرزه ها برای نتایج حاصل از روش اختلاف زمانی دوگانه (داده های همبستگی عرضی) و مکان یابی اولیه به روش غیرخطی احتمالاتی. نمودارهای د، ه و و، مقایسه خطای به ترتیب راستای طول جغرافیای، عرض جغرافیایی و عمق زمین لرزه ها برای نتایج حاصل از روش اختلاف زمانی دوگانه داده های همبستگی عرضی و داده ها بر اساس کاتالوگ زمین لرزه ها است. نمودار ز، مقایسه زمان باقیمانده برای نتایج حاصل از روش اختلاف زمانی دوگانه (داده های همبستگی عرضی) و مکان یابی اولیه به روش غیرخطی احتمالاتی را نشان می دهد. نمودارهای ح و ط، به ترتیب شکاف آزمون و فاصله نزدیک ترین ایستگاه لرزه نگاری به رومرکز زمین لرزه را نشان می دهند.



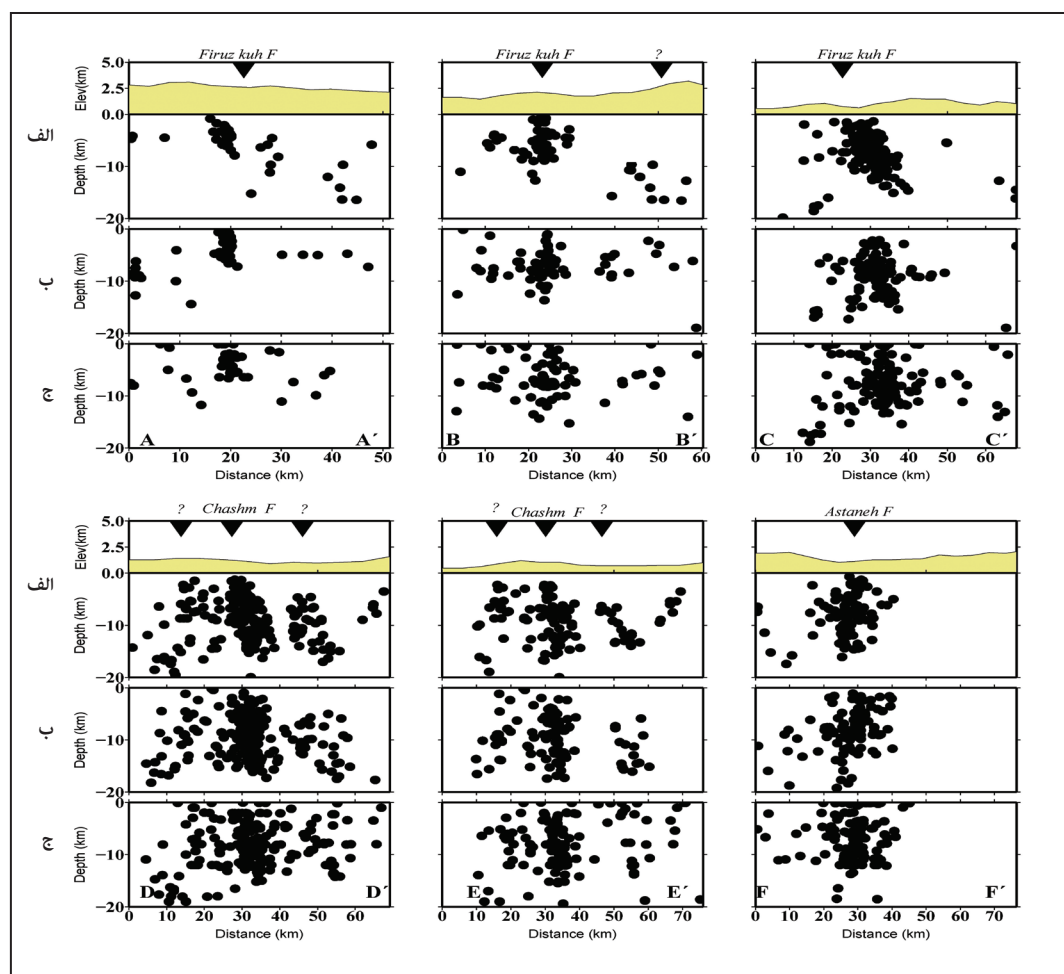


شکل ۱۰- مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها بر اساس داده‌های همبستگی عرضی و روش اختلاف‌زمانی دوگانه. خطوط سبز رنگ محل ترسیم مقاطع عرضی را مشخص می‌کنند که در شکل ۱۱ ارائه گردیده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مجموعه‌ای از روش‌ها و تکنیک‌ها به منظور بهبود مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های بخشی از ناحیه البرز شرقی مورد استفاده قرار گرفت. فازهای لرزه‌ای بر اساس بازخوانی مجدد و قرائت دستی و با دقت بسیار بالا قرائت گردید و بر اساس کیفیت هر فاز وزن مناسب به آن‌ها نسبت داده شد. مقایسه مکان‌یابی اولیه و مکان‌یابی صورت گرفته در مرکز لرزه‌نگاری کشوری نشان می‌دهد تجمع زمین‌لرزه‌ها بر روی گسل‌ها بیشتر شده و همخوانی بیشتری با روندهای گسلی شناخته شده دارند. نتایج ارائه شده در این مطالعه به‌ویژه مقاطع عمقی و نحوه توزیع زمین‌لرزه‌ها در عمق گسل‌ها در مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه می‌تواند بسیار مفید باشد. همچنین از تکنیک همبستگی عرضی جهت شناسایی زمین‌لرزه‌های مشابه و تکرارپذیر استفاده گردید و نقشه ارائه شده در شکل ۷ محل‌های تکرار زمین‌لرزه‌ها در ناحیه البرز شرقی را نشان می‌دهد. محل‌های تجمع زمین‌لرزه‌های تکرارپذیر را می‌توان کانون زمین‌لرزه‌ها در این ناحیه نیز نامید. علاوه بر این آنچه از نقشه رومرکزی زمین‌لرزه‌های این ناحیه مشخص است قطع ناگهانی وقوع زمین‌لرزه‌ها در کادر مشخص شده (با خط چین) میان دو قطعه گسلی چشم و آستانه است که می‌تواند به‌عنوان ناحیه‌ای با تجمع تنش بالا و شکاف لرزه‌ای تلقی گردد. مقاطع عرضی ترسیم شده بر روی نواحی محل تجمع رخدادهای تکراری و عمود بر روندهای گسلی در شکل ۱۱ آورده شده است. مقاطع عرضی عمود بر امتداد سه گسل فیروزکوه، چشم و آستانه انتخاب گردید است. برای هر مقطع عرضی سه نتیجه مختلف بر اساس مکان‌یابی اولیه به روش غیرخطی (مقطع پایین)، مکان‌یابی صورت گرفته بر اساس داده‌های کاتالوگ (مقطع وسط) و مکان‌یابی انجام شده بر اساس داده‌های همبستگی عرضی شکل موج

زمین‌لرزه‌ها (مقطع بالا) نشان داده شده است. در مقاطع A-A' و C-C' که بر روی گسل فیروزکوه ترسیم شده است، راستای به خط شدگی زمین‌لرزه‌ها در عمق شیب گسل به سمت جنوب را تأیید می‌کند. این شیب در مطالعات گذشته نظیر (Nemati et al., 2012) که بر پایه استفاده از داده‌های مکان‌یابی خردلرزه‌ها با استفاده از یک شبکه موقت بوده است به سمت جنوب تعیین گردیده است. همچنین مطالعه (Maleki et al., 2013) نیز که بر اساس مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها با روش غیرخطی احتمالاتی بوده است به سمت جنوب مشخص شده است. (Mottaghi et al., 2010) نیز در مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌های ناحیه البرز مرکزی با استفاده از روش اختلاف‌زمانی دوگانه شیب این گسل را به سمت جنوب معرفی کرده‌اند. در مقطع D-D' و E-E' که بر روی گسل چشم ترسیم شده است سه روند در مقطع داده‌های همبستگی عرضی مشخص گردیده است حال آنکه این روندها در مقاطع داده‌های کاتالوگ و مکان‌یابی اولیه صورت گرفته دارای وضوح کافی و تفکیک‌پذیری نمی‌باشند. در هر دو مقطع عرضی D-D' و E-E' روندهای یکدیگر را تأیید می‌کنند و نشانه‌هایی از شیب این گسل به سمت جنوب را نشان می‌دهند. گسل چشم با شیب به سمت جنوب و هم‌راستا با دو گسل دیگر که می‌تواند یک سیستم گسلی برای این ناحیه باشد دیده می‌شود. مقطع عرضی F-F' بر روی گسل آستانه و با پهنای ۳۰ کیلومتری از هر دو طرف پروفیل F-F' ترسیم شده است. تجمع و به خط شدگی زمین‌لرزه‌ها محل این گسل و نحوه توزیع رویدادهای لرزه‌ای آن در عمق را نشان می‌دهد که در آن زمین‌لرزه‌ها بر روی صفحه‌ای با شیب قائم مشخص شده‌اند.



شکل ۱۱- مقاطع عرضی زمین لرزه‌های ناحیه مورد مطالعه بر روی گسل‌های فعال فیروزکوه، چشم و آستانه. پنجره بالایی الف) مکان‌یابی بر اساس روش اختلاف‌زمانی دوگانه و داده‌های همبستگی عرضی، پنجره‌های میانی؛ ب) مکان‌یابی بر اساس روش اختلاف‌زمانی دوگانه و داده‌های کاتالوگ زمین لرزه‌ها و پنجره‌های پایینی؛ ج) مکان‌یابی اولیه بر اساس روش غیرخطی احتمالاتی.

کتابنگاری

بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌روش، ب. و مهاجر شجاعی، ا.، ۱۳۷۱- پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون به همراه نقشه‌های پیوست، گزارش شماره ۵۶، ج ۲، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.

بربریان، م.، قریشی، م.، طالبیان، م. و شجاع طاهری، ج.، ۱۳۷۵- پژوهش و بررسی نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر گسلش در گستره سمنان، شماره ۶۳، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.

حسامی آذر، ع.، ۱۳۸۲- نقشه گسل‌های فعال ایران. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

Reference

- 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. 10.1016/j.jog.2009.09.044.
- Ambraseys, N. and Melville, C., 1982-A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, New York.
- Ashtari Jafari, M., Hatzfeld, D. and Kamalian, N., 2005-Microseismicity in the region of Tehran. *Tectonophysics*. 395. 193-208. 10.1016/j.tecto.2004.09.011.
- Baer, M. and Kradolfer, U., 1987-An automatic phase picker for local and teleseismic events, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 77, 1437 – 1445.
- Deichmann, N. and Garcia-Fernandez, M., 1992-Rupture geometry from high-precision relative hypocentre locations of microearthquake clusters. *Geophys. J. Inr.* (1992) 110, 501-517.
- Fre'chet, J., 1985-Sismogene'se et doublets sismiques, The'se d'Etat, Universite ' Scientifique et Me'dicale de Grenoble, 206 pp.
- Geiger, L., 1912- Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only, (translated from Geiger's 1910 German article) *Bull. St. Louis Univ.*, 8 (1), 56-71.

- Hua, W., Chen, Z., Li, Z., Zhao, C. and Wang, Q., 2009-Seismic triggering and the aftershock distribution of the Wenchuan M8.0 earthquake. *Earthquake* 29(1): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Wu, J., Zhang, T. and Zhang, D., 2008-Relocation of the M8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China (Series D)* 51(12): 1 703–1 711.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002-Active tectonic of the South Caspian Basin. *Geophys. J. Int.* 148, 214–245.
- Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D. & Kradolfer, U., 1994-Initial reference models in local earthquake tomography, *J. Geophys. Res.*, 99, 19635-19646, 1994.
- Lomax, A. J., Virieux, P. and Volant, C. B., 2000-Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134.
- Maleki, V., Shomali, Z. H., Hatami, M. R., Pakzad, M. and Lomax, A., 2013-Earthquake relocation in the Central Alborz region of Iran using a non-linear probabilistic method. *Journal of Seismology*, Volume 17, Issue 2, pp.615-628.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y. T., 1998-Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces; *J. Earthquake. Pred. Res.* 7 465- 495.
- Mottaghi, A. A., Rezapour, .M. and Yaminifard, F., 2010-Double-Difference Relocation of Earthquake Hypocenters along the Southern Flank of the Central Alborz, Iran. doi: 10.1785/0120090147 *Bulletin of the Seismological Society of America* October 2010 vol. 100 no. 5A 2014-2023.
- Nakamura, Y., 1978-A moonquakes: Source distribution and mechanism, *Proc. Lunar planel. Sci. Conf. Rh*, 3589-3607.
- Nemati, M., Talebian, M., Sadidkhoy, A., Mirzaei, N. and Gheitanchi, M., 2012-Detailed crustal discontinuities, seismotectonic and seismicity parameters of the east-middle Alborz, Iran, flower structure of subsurface fault geometry. *Journal of the Earth and Space Physics*. 38. 1-15.
- Schaff, D. P., Bokelmann, G. H. R., Ellsworth, W. L., Zankerka, E., Waldhauser, F. and Beroza, G. C., 2000-Optimizing Correlation Techniques for Improved Earthquake Location. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 2, pp. 705–72.
- Tarantola, A. and Valette, B., 1982-Inverse problems = quest for information. *J. Geophys.*, 50, 159–170.
- Tarantola, A., 1987-Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation, Elsevier, Amsterdam, 613p.
- Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D. and Bergman, E., 2007-The 2004 May 28 Baladeh earthquake (Mw 6.2) in the Alborz, Iran: overthrusting the South Caspian Basin margin, partitioning of oblique convergence and the seismic hazard of Tehran. *Geophys. J. Int.* Pages 249-261.
- Thurber, C. H., 1985-Nonlinear Earthquake Location: Theory and example, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 3, pp. 779-790.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L., 2000-A double difference earthquake location algorithm; method and application to the northern Hayward fault California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90, 1353–1368.
- Zhao, B., Shi, Y. and Gao, Y., 2011-Relocation of aftershocks of the Wenchuan MS8.0 earthquake and its implication to seismotectonics,. *Earthq Sci* (2011) 24: 107–113,. doi:10.1007/s11589-011-0774-6.

Seismicity of East Alborz based on accurate earthquake relocation during two decades seismic data

V. Maleki¹, M. R. Hatami^{2*} and A. A. Mottaghi³

¹Ph.D., Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³Assistant Professor, University of Urmia, Urmia, Iran

Received: 2018 April 27

Accepted: 2018 September 12

Abstract

In this study, we investigate the seismicity of eastern Alborz based on precise location of the earthquakes during the last two decades. In order to reduce the effect of outliers and low quality data on earthquake location results, during phase reading, weighing has been done. Manual readings of seismic phases for the desired area have been provided with a seismic data bank in which 5461 phases S and 8523 phases have been read, compared to seismic phases read in The Iranian Seismological Center (IRSC) shows a significant increase. Initial location is based on phase picking and initial weights using a nonlinear probabilistic method (Lomax et al, 2000). After calculation of initial location, the double difference method (waldhauser et al, 2000) is used to enhance the earthquake location quality. The earthquake waveform correlation tool is used to re-find the earthquakes. Transparency correlations are performed for events with a similarity of over 70% in a given time window for phase P and S. As a result, using this technique, the phase reading error for the same events reaches its lowest level, resulting in seismic events in re-location with a much higher accuracy than the initial location and location based only on the catalog data. Results of waveform cross correlation shows that in this area, earthquakes with high similarity occurring at in different times. Investigating the location of earthquakes on the Firoozkough fault and then Chashm fault and Astaneh Fault in the cross sections.

Keywords: waveform cross correlation, East Alborz, phase picking, Relocation.

For Persian Version see pages 111 to 120

*Corresponding author: M. R. Hatami; E-mail: mrhatami@ut.ac.ir