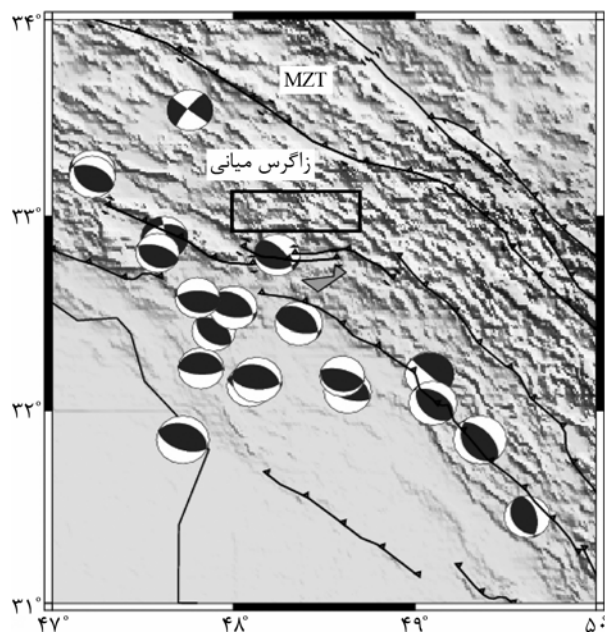


مطالعه ساختار لرزه‌ای در زاگرس میانی

مهرداد مصطفی‌زاده، استادیار، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

طور متوسط از حدود ۴۰ کیلومتر در زیر خلیج فارس تا بیش از ۶۰ کیلومتر در زیر (MZI) تغییر می‌کند. مطالعات صورت گرفته در خصوص مساحت تقریبی (S) و همچنین عمق (h) تعدادی از زمین‌لرزه‌های زاگرس با استفاده از روش مدل‌سازی موج تغییر این پارامترها را بین $48 < S < 138$ کیلومتر مربع و $5 < h < 15$ کیلومتر نشان می‌دهد [۲]، شکل (۱).



شکل (۱): گسل‌های منطقه زاگرس میانی، سازوکار تعدادی از زمین‌لرزه‌ها که توسط CMT تهیه شده است. منطقه مورد مطالعه با علامت نشان داده شده است.

نخستین تلاش برای تخمین ضخامت پوسته در بخشی از فلات ایران با استفاده از داده‌های زلزله‌شناسی توسط آسوده [۳] صورت گرفته است. مقادیر حاصله از این مطالعات برای ضخامت پوسته، گرچه پراکنده و با دقت کم می‌باشند، اما نخستین اندازه‌گیری‌های به دست آمده توسط داده‌های زلزله‌شناسی برای ایران می‌باشد. این مطالعات ضخامت متوسط پوسته در زیر زاگرس را حدود ۴۵ کیلومتر تخمین زده است.

حوزه زاگرس میانی در تقسیم‌بندی تکتونیکی نوار زاگرس از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بررسی مشاهدات زلزله‌شناسی - زمین‌شناسی و ژئوفیزیک گسترده در منطقه شناسایی معادن گسترده هیدروکربنی را به همراه داشته است. نظر به اهمیت موضوع، عملیات نصب دستگاه‌های لرزه‌ای به منظور جمع‌آوری اطلاعات لرزه‌ای طی یک دوره چهار ماهه صورت گرفته است. خصوصیات زمین‌لرزه‌های روی داده، در رابطه با تکتونیک منطقه‌ای به عنوان بخشی از مطالعات لرزه زمین‌ساختی منظور می‌گردد که خود شامل توزیع جغرافیایی کانون سطحی زمین‌لرزه‌ها، بزرگی، عمق و سازوکار کانونی گسل‌های منطقه را شامل می‌شود.

نتایج به دست آمده از جمع‌آوری اطلاعات لرزه‌ای منطقه عمق پهنه لرزه‌خیزی را بین ۵-۲۰ کیلومتر نشان می‌دهد. همچنین فراوانی رخداد‌های لرزه‌ای مؤید دگرشکلی بالا در لایه‌های رسوبی می‌باشد. روند غیر یکسان لرزه‌ای در منطقه نشان از پراکندگی حوزه‌های تنش در منطقه می‌باشد. در چنین شرایطی غیر یکسان بودن مقدار دگرشکلی پوسته زمین در طول گستره زاگرس به دور از انتظار نخواهد بود.

کلیدواژه‌ها: زاگرس میانی، عمق کانونی، شبکه موقت لرزه‌نگاری

۱- مقدمه

در خصوص ساختار پوسته و جبه در زیر فلات ایران به استثنای لایه‌های رسوبی نواحی نفت‌خیز، در سایر نواحی اطلاعات اندک و پراکنده از ساختار زمین وجود دارد. نخستین داده‌ها از ضخامت پوسته در زیر ناحیه زاگرس از داده‌های گرانی‌سنجی حاصل شده است [۱]. پوسته در زیر فلات ایران در امتداد گسل معکوس اصلی زاگرس (MZI) (Main Zagros Thrust)، ضخیم‌ترین ناحیه می‌باشد. طبق این داده‌ها، ضخامت پوسته در زیر زاگرس به

خصوصیات فیزیکی و زمین‌شناسی زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

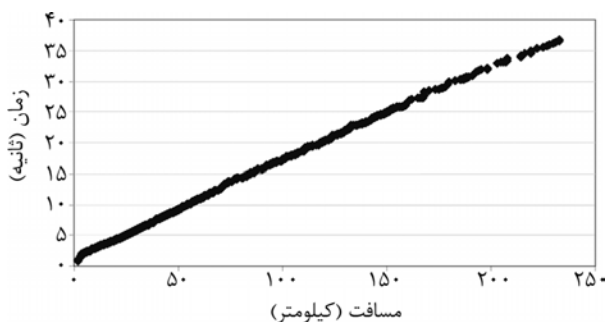
۳- محاسبه پارامترهای کانونی

تعیین محل و بزرگی زمین‌لرزه‌ها با کمک نرم‌افزار "HYPOCENTER" متصل به سیستم پردازش و بانک داده "SEISAN" انجام می‌پذیرد [۵]. "Hypocenter" یک برنامه فرترن برای تعیین محل زمین‌لرزه‌های محلی، ناحیه‌ای و جهانی است. در این برنامه دو الگوریتم به کار رفته در برنامه‌های "HYPO71" و "HYPOINVERSE" و میرایی آدپتیو (Adaptive Damping) ترکیب شده است. در این برنامه فازهای S_n , S_g , P_n , P_b , P_g و S_b در مدل چند لایه‌ای قابل تشخیص هستند. علاوه بر آن در این برنامه تستهایی جهت حذف خودکار باقیمانده‌های بزرگ زمانی انجام می‌شود. همچنین محاسبه بزرگیهای ML , MS و MC توسط این برنامه امکانپذیر است.

مدل سرعت به کار رفته جهت تعیین محل، ترکیبی از مدل‌های سرعت ارائه شده برای مناطق البرز، ایران مرکزی و زاگرس می‌باشد [۶-۸]، جدول (۱) و شکل (۲).

جدول (۱): مدل سرعت به کار رفته برای تعیین محل زمین‌لرزه‌ها در شبکه.

نسبت V_p/V_s	مرز لایه (کیلومتر)	سرعت موج P (کیلومتر بر ثانیه)
۱/۷۳	۰	۵/۴
۱/۷۳	۶	۵/۹
۱/۷۳	۱۴	۶/۳
۱/۷۳	۱۸	۶/۵
۱/۷۳	۴۶	۸/۰۵
۱/۷۳	۸۰	۸/۱



شکل (۲): نمودار مسافت- زمان موج P زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه موقت.

نخستین داده‌های دقیق از ساختار یک بعدی پوسته در زیر زاگرس با استفاده از نگاهشتهای زلزله‌شناسی توسط سندوال و همکاران [۴] با استفاده از روش تابع گیرنده و زمان رسیدن $P-S$ زلزله‌های محلی در یک ایستگاه موقت در ناحیه قیر در جنوب شرقی زاگرس حاصل شده است. طبق مطالعه مذکور، پوسته بالایی از یک لایه رسوبی به ضخامت ۱۱ کیلومتر و سرعت موج فشارشی (V_p) حدود ۵/۸۵ کیلومتر بر ثانیه بر روی پی سنگ بلورین به ضخامت حدود ۸ کیلومتر تشکیل شده است. ضخامت پوسته زیرین در این مطالعه حدود ۲۷ کیلومتر و سرعت موج فشارشی آن حدود ۶/۵ کیلومتر بر ثانیه تخمین زده شده است. با این لایه-بندی، ناپیوستگی موهو در زیر زاگرس در عمق 46 ± 2 کیلومتر قرار می‌گیرد.

۲- اطلاعات پایه

تعیین محل وقایع لرزه‌ای با دقت زیاد نقش اساسی در مطالعات زلزله‌شناسی و زلزله‌شناسی مهندسی دارد که عدم توجه به آن صحت تفسیر نتایج را با ابهام مواجه می‌سازد. مجموعه مواردی که در محاسبه پارامترهای کانون زمین‌لرزه نقش بنیادی را ایفاء می‌کنند، عبارتند از:

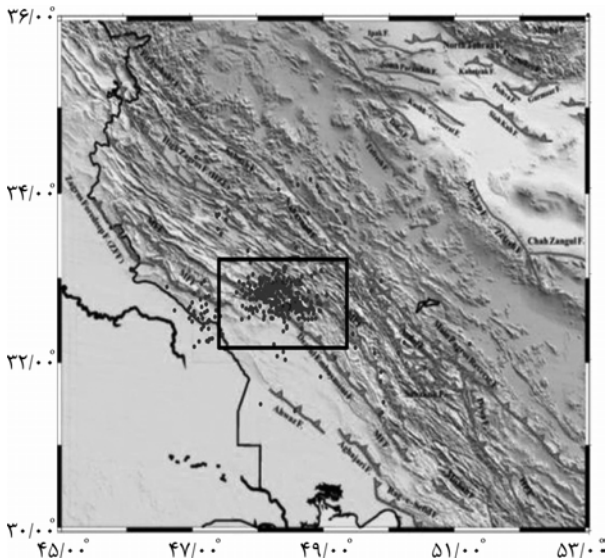
- ۱- اطلاعات مربوط به نحوه کالیبراسیون شبکه‌های لرزه‌ای؛
- ۲- اطلاعات مربوط به زمان سیر فازهای لرزه‌ای؛
- ۳- اطلاعات مربوط به تقسیم‌بندی ناحیه‌ای لرزه‌ای و تکتونیکی منطقه؛
- ۴- اطلاعات مربوط به مدل‌های سرعت فازهای لرزه‌ای در زمین.

مبنا و پایه تحلیل کانون زمین‌لرزه‌ها آنالیز لرزه‌خیزی یا رویداد زمین‌لرزه‌ها در حوزه زمان و مکان می‌باشد. به این منظور، مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده از مجموع ایستگاههای شبکه موقت برای تجزیه و تحلیل آماری زمین‌لرزه‌ها جهت برآورد ویژگیهای لرزه‌خیزی در گستره مورد مطالعه تهیه شده است.

تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع این پارامترها بیان‌کننده وضعیت لرزه‌خیزی یک پهنه یا یک گسل می‌باشد که با کمیت عددی بیان می‌گردد. برای مطالعه این پارامترها ابتدا نیاز است تا

۴- مطالعه ساختار لرزه‌ای در زاگرس میانی بر اساس داده‌های ثبت شده در شبکه موقت

۴-۱- موقعیت جغرافیایی شبکه لرزه‌نگاری منطقه مورد مطالعه

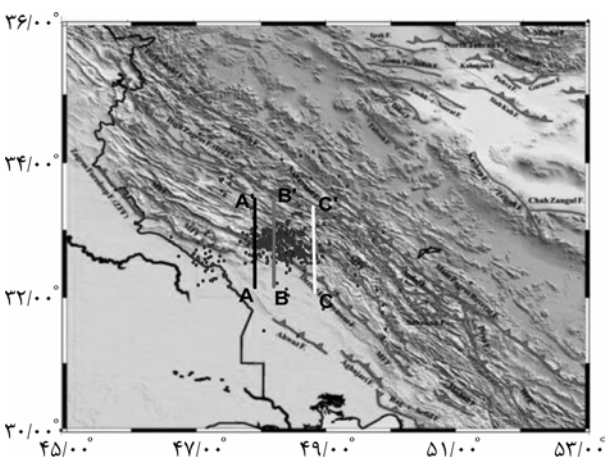


شکل (۳): پراکندگی زمین‌لرزه‌های روی داده در مدت چهار ماه.

چگالی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در منطقه و همچنین روش‌های مورد استفاده در تعیین ژرفا دارد.

به جرأت می‌توان گفت که عمق کانونی از میان تمامی مؤلفه‌های زلزله بیشترین خطا را در بر دارد. حتی در زمین‌لرزه‌های دستگاهی بعد از سال ۱۹۶۳ نیز این عدم قطعیت موجود می‌باشد. عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های کم عمق دقت بیشتری خواهد داشت. البته این امر زمانی دارای عدم قطعیت کمتری خواهد بود که هندسه شبکه بتواند به نحو مطلوبی محل رخداد زمین‌لرزه را احاطه کرده باشد.

برای بررسی دقیقتر این موضوع، تغییرات عمق در امتداد پروفیل‌های متعدد در ناحیه مورد مطالعه محاسبه و ترسیم شده است. شکل‌های (۴) - (۷).



شکل (۴): مقاطع عمقی اعمال شده بر گستره مورد مطالعه.

مطالعات اولیه برای تعیین موقعیت ایستگاه‌ها از ابتدای سال ۸۷ انجام شد و سپس ۱۵ موقعیت برای ایجاد شبکه لرزه‌نگاری انتخاب دستگاه‌های لرزه‌نگاری در موقعیت‌های از قبل تعیین شده استقرار یافت. محدوده مورد نظر بین طول‌های جغرافیایی ۴۷/۳۰ تا ۴۹/۵۰ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ تا ۳۳/۳۰ درجه می‌باشد. این شبکه از لرزه‌نگارهای باند متوسط *CMG-6TD* تشکیل شده است. این تجهیزات لرزه‌نگاری مجهز به *GPS* و سیستم رقمی کننده ۲۴ بیتی هستند. در طی مدت فعالیت شبکه، غالب زمین‌لرزه‌هایی که محدوده طرح تعیین محل گردیده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- لرزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه

اطلاعات زمین‌لرزه‌های سده بیستم بر اساس کاتالوگ‌های زلزله‌شناسی معتبر از جمله مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (*ISC*)، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (*USGS*) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (*IIEES*) نشان می‌دهد که بیش از ۹۰۰ رویداد لرزه‌ای از سال ۱۹۶۰ میلادی تاکنون در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. توزیع مکانی رویدادهای لرزه‌ای با تفکیک بزرگیهای مختلف نشان می‌دهد که اکثر این رویدادهای لرزه‌ای در امتداد گسل‌های فعال و اصلی منطقه رخ داده‌اند.

وجود داده‌های حاصل از زمین‌لرزه‌های محلی ثبت شده توسط شبکه‌های لرزه‌نگاری مستقر در منطقه، اطلاعات دقیق و باارزشی را در خصوص فعالیت گسل‌های منطقه، عمق لایه لرزه‌زا، هندسه گسل‌های فعال و تعیین سازوکار آنها را فراهم می‌سازد. شکل (۳) پراکندگی زمین‌لرزه‌های محلی ثبت شده توسط شبکه موقت را نشان می‌دهد.

۴-۳- ژرفای کانونی زمین‌لرزه‌ها

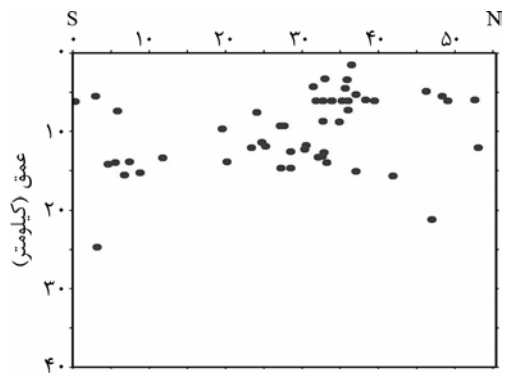
ژرفای کانونی، یکی از پارامترهای زمین‌لرزه است که با خطای قابل‌ملاحظه‌ای همراه است. این خطا بستگی به

۵- یافته‌ها

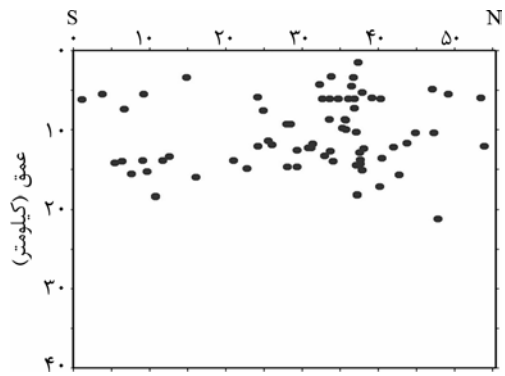
با توجه به زمین‌لرزه‌های ثبت شده در دوره چهار ماه اول استقرار شبکه موقت بیشترین فعالیت‌های لرزه‌ای مربوط به خرد لرزه‌های $1 < M < 2$ می‌باشد و مقادیر متغیر باقیمانده‌های RMS مرتبط با تعیین محل رومرکز زمین‌لرزه‌ها نشان از دقت مناسب در تعیین پارامتر کانونی رخداد‌های ثبت شده دارد. پروفیل‌های مربوط به عمق زمین‌لرزه‌ها دربرگیرنده اطلاعات مربوط به صفحه شکستگی در عمق می‌باشد. خوشه‌های لرزه‌ای ظاهر شده بر روی پهنه شکستگی معرف گسل‌های پنهان در عمق می‌باشد که الزاماً آثار آن در سطح دیده نمی‌شود. تجمع کانون زمین‌لرزه‌ها در عمق $5 < h < 15$ نشان از تنش موجود در پی سنگ زیرین لایه‌های رسوبی است که موجبات تغییر شکل لایه‌های رسوبی را مهیا می‌سازد. ارزیابی پروفیل‌های عمقی در شکل (۸) با مدل کاپیانی [۹] حاکی از نبود لرزه‌ای (*Seismic Gap*) در عمق‌های بیش از ۲۰ کیلومتری می‌باشد. با عنایت به معرفی مرز موهو در عمق تقریباً ۴۰ کیلومتری در زاگرس چین‌خورده (در مدل کاپیانی [۹])، می‌توان پروفیل عمقی منطقه را چنین تشریح نمود. چین‌خوردگی‌های حاصل از تنش موجود در لایه‌های پی سنگی (*Granit*) می‌تواند شکستگی‌های متعددی در رسوبات فوقانی به همراه داشته باشد و در نهایت ظهور خوشه‌های لرزه‌ای را پیرامون گسل‌های پی سنگی باعث گردد، شکل (۹). در شکل (۱۰)، پهنه شکستگی در محور قائم به تصویر کشیده شده است که نشان از دگرشکلی نامتقارن در حوزه رسوبی می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

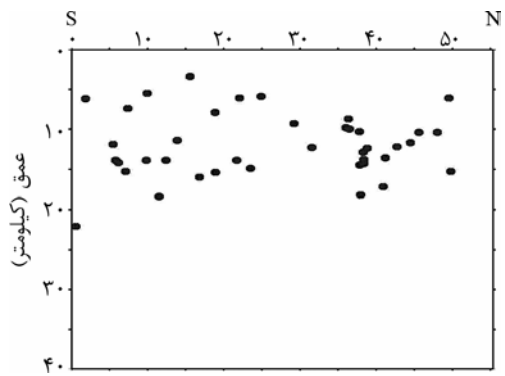
نتایج حاصل از مطالعه عمق زمین‌لرزه‌ها در ناحیه چین‌خورده زاگرس، نشان از دگرشکلی پیوسته در این ساختار لرزه زمین‌ساختی می‌باشد. فرآیند دگرشکلی عمدتاً به صورت چین‌خوردگی در لایه‌های رسوبی و شکستگی گسل‌های معکوس پنهان در پوسته بالایی ظاهر می‌گردد. تاکنون جابه‌جایی و تغییرشکل در امتداد گسله‌های معکوس در زیر لایه‌های رسوبی موجب رخداد زلزله‌های متعدد با بزرگای کوچکتر از ۷ در ناحیه زاگرس شده است. امتداد این گسل‌ها تا مرز گسیختگی (*Detachment Horizon*) ادامه می‌یابد.



شکل (۵): مقطع عمود بر روند گسل‌های منطقه، راستا ۴۸ درجه طولی.



شکل (۶): مقطع عمود بر روند گسل‌های منطقه، راستا ۴۸/۳۳ درجه طولی.

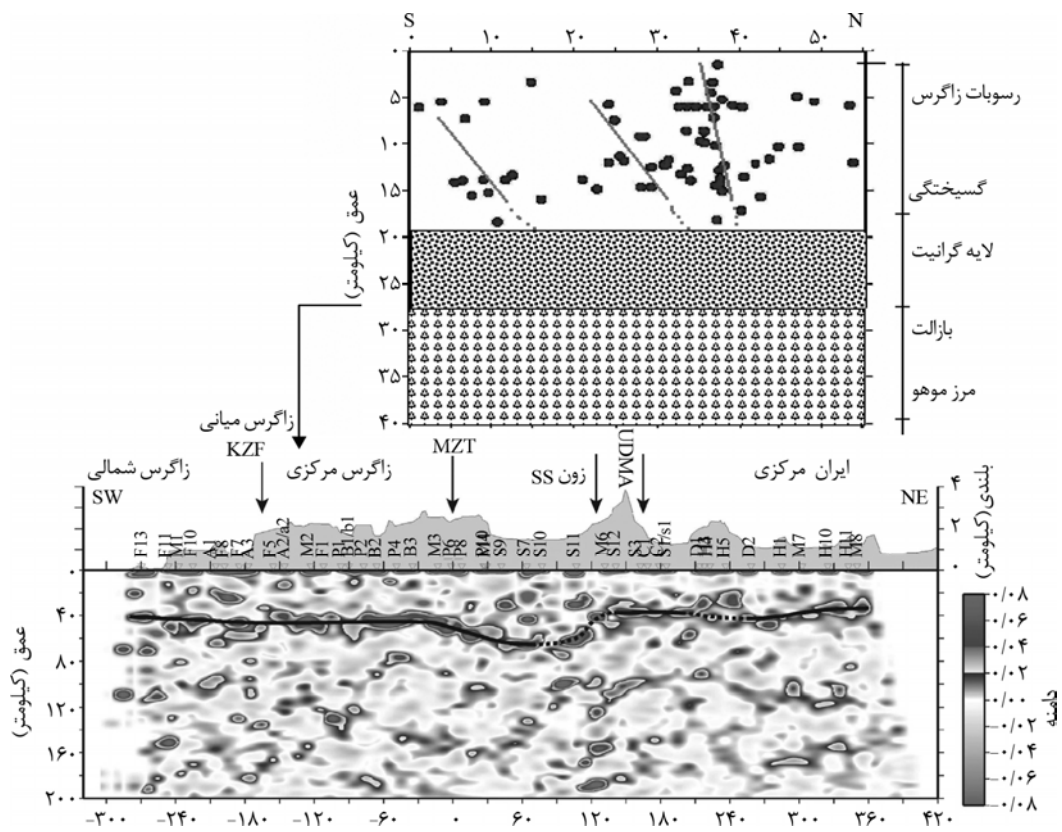


شکل (۷): مقطع عمود بر روند گسل‌های منطقه، راستا ۴۸/۶۶ درجه طولی.

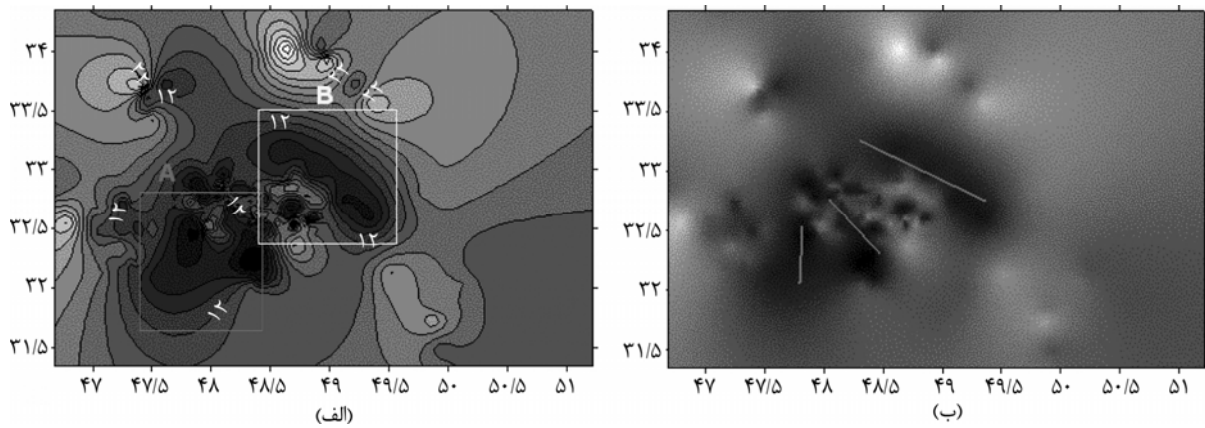
بررسی شکل‌های (۵) تا (۷) نشان می‌دهد که عمده خوشه‌های لرزه‌ای در اعماق کمتر از ۲۰ کیلومتر ظاهر شده است.

توزیع مکانی عمق رویدادهای لرزه‌ای در نیمه شرقی خصوصاً از امتداد AA' و BB' مؤید آن است که زون لرزه‌خیز و فعال پهنه در این ناحیه قرار دارد و در عمق تقریبی ۵ تا ۱۵ کیلومتری واقع شده است.

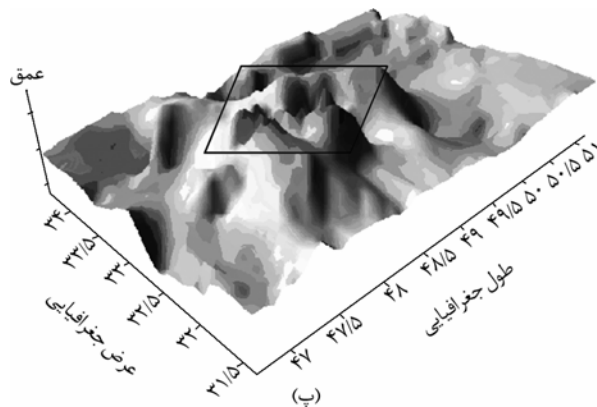
مطالعه ساختار لرزه‌ای در زاگرس میانی



شکل (۸): پروفیل عمقی BB' با مدل ارائه شده توسط کاویانی [۹].



شکل (۹): پهنه لرزه‌خیز مورد مطالعه را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. الف) کنتورهای عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها در محدوده مورد مطالعه می‌باشد که صفحات شکستگی را به وضوح نشان می‌دهد. ب) بر روی صفحات شکستگی گسلها را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): تصویر پهنه شکستگی بالا رود در عمق را نشان می‌دهد که در راستای x، y و z به تصویر کشیده شده است.

4. Sandvol, E., Al-Damegh, K., Calvert, A., Seber, D., Barazangi, M., Mohamad, R., Gök, R., Türkelli, N., and Gürbüz, C. (2001). Tomographic imaging of Lg and Sn propagation in the Middle East, *Pure Appl. Geophys.*, **158**, 1121-1163.
5. Lienert, B.R.E., Berg, E., and Farzer, L.N. (1986). Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled and adaptively least squares, *BSSA*, **76**, 771-783.
6. Tatar, M. (2001). Etude Sismotectonique de deux zones de collision continentale: Le Zagros central et l'Alborz, Ph.D. thesis, University of Joseph Fourier-Grenoble.
7. Javan, J. and R. Roberts (2003). Crustal and uppermost mantle structure of Tehran region from teleseismic P-waveform receiver function analysis, *Tectonophysics*, **364**, 115-133.
8. Paul, A., Kaviani, A., Hatzfeld, D., Vergne, J., and Mokhtari, M. (2006). Seismological evidence for crustal-scale thrusting in the Zagros mountain belt (Iran), *Geophysics Journal International*, **166**, 227-237.
9. Kaviani, A. (2004), La chaîne de collision continentale du Zagros (Iran): structure lithosphérique par analyse de données sismologique. PhD thesis, Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Université Joseph Fourier-Grenoble-I.

وجود گسل‌های پنهان در عمق احتمالاً می‌تواند موجبات به تله افتادن حوزه‌های نفتی را منجر گردد که به لحاظ اقتصادی در مطالعات اکتشافی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را به پاس زحمات گروه آزمایشگاهی پژوهشکده زلزله‌شناسی که در نصب، نگهداری و جمع‌آوری اطلاعات لرزه‌ای همکاری نمودند، همچنین مهندس آرش اسلامی و واحد نشر پژوهشگاه اعلام می‌دارم.

۸- مراجع

1. Dehghani, G.A. and Makris, J. (1983). The gravity field and crustal structure of Iran, In: Geodynamics Project (geotraverse) in Iran, Geological Survey of Iran, Report No. 51, 51-68.
۲. مصطفی‌زاده، مهرداد (۱۳۷۸). حل معکوس امواج پیکری دورلرزه در حوزه زاگرس، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
3. Asudeh, I. (1982). Seismic structure of Iran from surface and body wave data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **71**, 715-730.