

## بررسی پارامتر چشمه زمین‌لرزه‌های آذرماه ۱۳۹۲ در گستره کرمانشاه

امین رشیدی<sup>۱\*</sup>، سیده نگین معینی<sup>۲</sup> و محمدرضا قیطانچی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد ژئوفیزیک- زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار ژئوفیزیک- زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استاد ژئوفیزیک- زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: آبان ۱۳۹۳، بازنگری: دی ۱۳۹۳، پذیرش: بهمن ۱۳۹۳

**چکیده:** در این مطالعه، سازوکار کانونی برای چهار زمین‌لرزه رخ داده در آذرماه ۱۳۹۲ در گستره کرمانشاه با بزرگی  $M_w > 4/5$ ، از طریق برگردان خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان و با استفاده از الگوریتم ایزولا به‌دست آمده است. در این الگوریتم، روش واهمامیخت تکراری برای تمام شکل موج به کار گرفته شده و تابع گرین با روش عدد موج ناپیوسته محاسبه می‌شود. برگردان تانسور گشتاور برای این چهار زمین‌لرزه، لغزش معکوس با کمی مؤلفه امتدادلغز را نشان می‌دهد. عمق مرکزوار محاسبه شده برای این چهار زمین‌لرزه به ترتیب ۱۲، ۸، ۹ و ۱۰ کیلومتر به‌دست آمده است. گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده به ترتیب  $10^{17} \times 2,4$ ،  $10^{17} \times 3,3$ ،  $10^{16} \times 1,1$  و  $10^{17} \times 1,5$  نیوتن‌متر است که به ترتیب بزرگی‌های گشتاوری ۵,۶، ۴,۶ و ۵,۴ را نتیجه می‌دهد. مقدار کاهش واریانس برای چهار زمین‌لرزه رخ داده به ترتیب، ۰,۷۱، ۰,۸۲، ۰,۷ و ۰,۷۴ محاسبه شده است. مکان‌یابی مجدد خردزمین‌لرزه‌ها و مقطع عرضی عمود بر آن‌ها و همچنین سازوکارهای به‌دست آمده، نشان می‌دهد که به احتمال زیاد، فعالیت شاخه‌های شمال‌غربی سامانه گسلی پیشانی کوهستان زاگرس مسبب رویداد این زمین‌لرزه‌ها در گستره کرمانشاه بوده است که دارای روند کلی شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و شیب تقریبی شمال‌شرقی است.

**واژه‌های کلیدی:** سازوکار کانونی زمین‌لرزه، برگردان خطی تانسور گشتاور، الگوریتم ایزولا، گستره کرمانشاه، مکان‌یابی مجدد

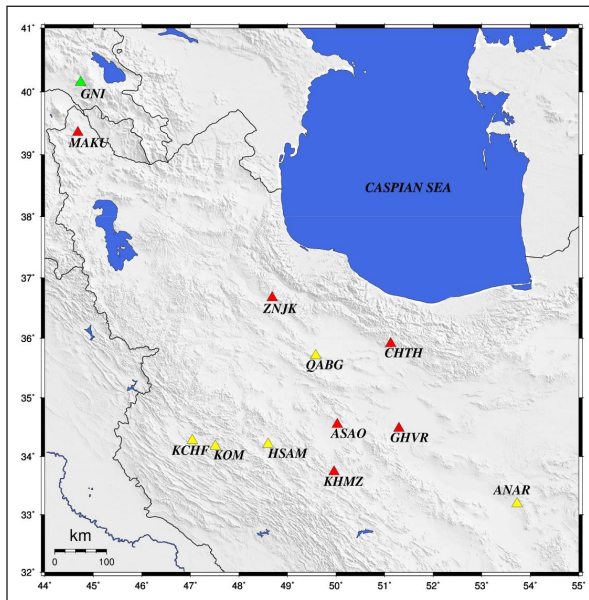
### مقدمه

تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شکل موج کامل نگاهت‌ها است. کاربرد این روش‌ها می‌تواند در تعیین دقیق‌تر عمق کانونی و گشتاور زمین‌لرزه و شناخت بهتر چگونگی دگرشکلی یک منطقه کمک شایانی کنند. هدف وارون‌سازی یافتن مدلی از تانسور گشتاور است که توجیه‌کننده فرایند فیزیکی ایجادکننده زمین‌لرزه باشد و همچنین پی‌بردن به تغییرات مکانی-زمانی لغزش روی صفحه گسل و نحوه تکامل فرایند شکست است. نتیجه‌های وارون‌سازی اغلب یکتا نیستند و نیازمند ایجاد قیدها و محدودیت‌هایی بر مسأله وارون هستند [۶، ۱۳ و ۱۵]. هدف از این مطالعه، تعیین سازوکار کانونی چهار زمین‌لرزه رخ داده در روزهای

امروزه تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مباحث موجود در مطالعات زلزله‌شناسی و لرزه‌زمین‌ساخت است. درک دقیق فرایندهای فیزیکی حاکم بر گسلش در طی رخداد زمین‌لرزه‌ها مستلزم وجود دانشی دقیق از پارامترهای چشمه ایجادکننده زمین‌لرزه است. اگرچه با استفاده از چند ثانیه اول نگاهت زمین‌لرزه‌ها می‌توان اطلاعات مهمی نظیر تعیین محل و حل صفحه گسل را به دست آورد ولی لازم است که از کل نگاهت برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر استفاده کرد [۱۱]. وارون‌سازی شکل موج یک ابزار قدرتمند برای محاسبه

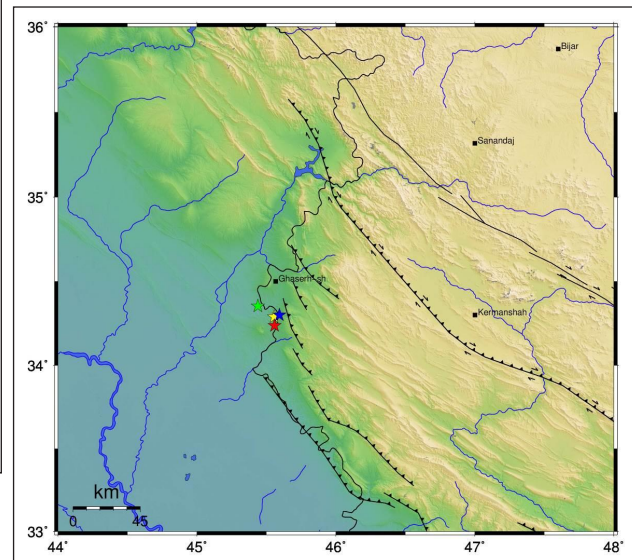
\*عهده‌دار مکاتبات: amin.rashidi@ut.ac.ir

در این مطالعه به منظور تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، از داده‌های شکل موج ثبت‌شده در ایستگاه‌های باند پهن وابسته به مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و همچنین یکی از ایستگاه‌های شبکه جهانی IRIS به نام Garni که در کشور ارمنستان واقع است، استفاده شد. جدول (۲) مشخصات و شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های موردنظر را نشان می‌دهند.



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری که داده‌های آن‌ها جهت تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها استفاده شده است. ایستگاه‌های وابسته به مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و شبکه جهانی IRIS به ترتیب با مثلث‌های زرد، قرمز و سبزرنگ مشخص شده‌اند.

اول و سوم آذرماه ۱۳۹۲ در گستره کرمانشاه در غرب ایران با بزرگی  $M_w < 4.5$  رخ دادند است. در این مطالعه به منظور تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌های موردنظر از روش برگردان تانسور گشتاور در حوزه زمان، بر اساس مدل‌سازی شکل موج با استفاده از نرم‌افزار ISOLA4 استفاده شد. در این روش از الگوریتم واهمامیخت تکراری Kikuchi و Kanamori [۱۹۹۱] استفاده می‌شود و توابع گرین به روش عدد موج گسسته Bouchon [۱۹۸۱] محاسبه می‌شوند. جدول (۱) مشخصات چهار زمین‌لرزه موردبررسی را که توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IGUT) اعلام شده، آورده شده است. شکل (۱) نقشه رومرکز چهار زمین‌لرزه مذکور را که توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری تعیین محل شده‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۱- رومرکزهای تعیین شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای چهار زمین‌لرزه اصلی رخ داده در گستره کرمانشاه، رویدادهای اول تا چهارم به ترتیب با ستاره‌های سبز، زرد، قرمز و آبی‌رنگ مشخص شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات ارایه شده به وسیله مرکز لرزه‌نگاری کشوری برای زمین‌لرزه‌های اصلی رخ داده

Case No.	Date	Origin time (UTC)	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Depth (km)	Mag (Mw)
۱	۲۰۱۳-۱۱-۲۲	۰۶:۵۱:۲۴.۴	۳۴.۳۵	۴۵.۴۴	۱۰	۵.۶
۲	۲۰۱۳-۱۱-۲۲	۱۸:۳۰:۵۷.۵	۳۴.۲۹	۴۵.۵۶	۱۰	۵.۷
۳	۲۰۱۳-۱۱-۲۳	۲۳:۲۶:۲۰.۲	۳۴.۲۴	۴۵.۵۶	۱۰	۴.۷
۴	۲۰۱۳-۱۱-۲۴	۱۸:۰۵:۴۲.۸	۳۴.۳۰	۴۵.۵۹	۱۴	۵.۵

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های لرزه‌نگاری که داده‌های آن‌ها جهت تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها استفاده شده است

Station	code	Longitude (E °)	Latitude (N °)	Affiliation
Zanjan	ZNJK	۴۸.۶۸۵	۳۶.۶۷	IIEES
Cheshme Sefid	KCHF	۴۷.۰۴۰۴	۳۴.۲۷۵	IRSC
Anar	ANAR	۵۳.۷۲۸۸	۳۳.۱۸۹	IRSC
Garni	GNI	۴۴.۷۴۱	۴۰.۱۴۹	IRIS
Ghom	GHVR	۵۱.۲۹۵	۳۴.۴۸	IIEES
Charan-Tehran	CHTH	۵۱.۱۲۶	۳۵.۹۰۸	IIEES
Maku	MAKU	۴۴.۶۸۳	۳۹.۳۵۵	IIEES
Samen	HSAM	۴۸.۶۰۲	۳۴.۲۱۱	IRSC
Ashtian	ASAO	۵۰.۰۲۵	۳۴.۵۴۸	IIEES
Khomeyn	KHMZ	۴۹.۹۵۹	۳۳.۷۳۹	IIEES
Komasi	KOM	۴۷.۵۱۴۴	۳۴.۱۷۶	IRSC
Abgarm-Qazvin	QABG	۴۹.۵۸۲۳۸	۳۵.۷۰۸۴	IRSC

#### زمین‌شناسی و لرزه زمین‌ساخت منطقه

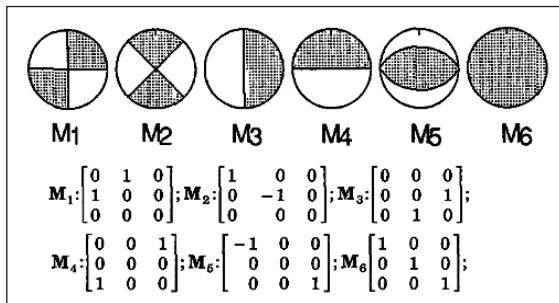
کنش فشارشی به صورت خردشدگی در سنگ‌ها نمود دارد. همه ارتفاعات واقع در بخش جنوب باختری کرمانشاه را می‌توان مربوط به گستره زاگرس برجا دانست.

کمربند چین‌خورده زاگرس شامل طاق‌دیس‌های بزرگ و کشیده‌ای جعبه‌ای شکل است. زاگرس چین‌خورده قسمتی از گودی حاشیه‌ای سپر عربستان است که در زمان مزوزوئیک در حال نشست مداوم بوده ولی در زمان سنوزوئیک به یک حوضه رسوبی همراه با کوه‌زایی تبدیل شده است. به همین دلیل سنگ‌های مزوزوئیک آن معرف حوضه‌های رسوبی با ژرفای متوسط است ولی سنگ‌های سنوزوئیک نشان‌دهنده ردیف‌های رسوبی یک دریای پسرونده به سمت جنوب است. کمربند چین‌خورده ساده زاگرس در سمت شمال خاوری توسط گسل زاگرس مرتفع و در جنوب باختری توسط گسل پیشانی کوهستان محدود می‌شود. گسل پیشانی کوهستان به‌عنوان مرز زاگرس چین‌خورده ساده با کوهپایه‌ها و دشت ساحلی خلیج فارس است که با شواهد ساختاری، توپوگرافی، ریخت زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی مشخص می‌شود. گسل رانده پوشیده پیشانی کوهستان با درازای بیش از ۱۳۵۰ کیلومتر در ایران از قطعات رانده متعددی با طول‌های ۱۵ تا ۱۱۵ کیلومتر تشکیل شده است. مطالعه پهناهای مه‌لرزه‌ای زمین‌لرزه‌های رویداده با بزرگی متوسط تا زیاد

داده‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهد که بیشترین بخش گستره کرمانشاه از آن حوضه رسوبی- ساختاری زاگرس است که شامل دو زیر پهنه زاگرس مرتفع و زاگرس چین‌خورده است. مرز بین این دو زیر پهنه چندان آشکار نیست و به نظر می‌رسد که گذر از زاگرس مرتفع به زاگرس چین‌خورده تدریجی است، ولی الگوی ساختاری این دو زیر پهنه تفاوت‌های آشکاری دارد. بخش قیاس شده با زاگرس مرتفع در بخش شمال خاوری کرمانشاه قرار دارد. در این‌جا سنگ‌های پرکامبرین پسین- تریاس میانی پروتوزئیک ندارند ولی سنگ‌های تریاس بالا- کرتاسه شامل رسوب‌های نواحی ژرف است، که در بین آن‌ها ردیف‌های رسوبی از نوع رادیولاریت، کربنات‌های آشفته و نیز سنگ‌های افیولیتی دارای بیشترین مقدار هستند. زاگرس مرتفع دارای بیشترین میزان بالآمدگی و ارتفاع در زاگرس است. ارتفاع در این بخش به ۴۰۰۰ متر می‌رسد و شامل مرتفع‌ترین کوهستان‌ها و عمیق‌ترین رخنمون‌ها (با بیرون‌زدگی پالتوزوئیک زیرین در هسته طاق‌دیس‌های رانده‌شده) نسبت به سایر واحدهای ریخت زمین‌ساختی در کوهستان‌های زاگرس است. الگوی ساختاری این ناحیه حاصل عملکرد گسل‌های رانده‌ای است، که با جابجایی درخور توجه رخنمون‌های سنگی و ستبر شدن پوسته همراه است. جابه‌جایی به‌دست آمده از این

### روش تحقیق

در این مطالعه، از روش برگردان تانسور گشتاور در حوزه زمان به‌منظور تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌های موردنظر و محاسبه تانسور گشتاور بر اساس مدل‌سازی شکل موج با استفاده از ISOLA4 [۱۱] استفاده شد. الگوریتم حاکم بر ایزولا در واقع بسط یافته روش واهمامیخت تکراری [۷] براساس شش تانسور گشتاور پایه‌ای<sup>(۱)</sup> است (شکل ۳) که توسط Zahradnik و همکاران [۱۵] است که با استفاده از کد فورترن نوشته شده و در محیط متلب اجرا می‌شود و قابلیت نمایش تانسور گشتاور چشمه نقطه‌ای یا چندگانه را دارد. در الگوریتم ایزولا، محاسبه تابع گرین به روش عدد موج گسسته Bouchon [۵] برای فواصل محلی منطقه‌ای تانسور گشتاور انجام می‌شود. در این روش برای وارون‌سازی تانسور گشتاور در حوزه زمان از شکل موج کامل نگاشت‌های سرعت استفاده می‌شود. در روش کیوکچی-کاناموری، چشمه مجموعه‌ای از چشمه‌های نقطه‌ای در نظر گرفته شده و زیر رویدادها با روش برگردان واهمامیخت تکراری از شکل موج‌ها تعیین می‌شوند [۲]. وارون‌سازی با روش حداقل مربعات<sup>(۲)</sup> انجام می‌شود و مکان و زمان وقوع چشمه‌های نقطه‌ای جستجوی شبکه‌ای می‌شوند. پس از تصحیح پاسخ دستگاهی نگاشت‌ها یک فیلتر میان‌گذر بر روی داده‌ها بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. سپس در مرحله بعد، نرم‌افزار نگاشت‌های سرعت را به جابجایی تبدیل کرده و با محاسبه توابع گرین که تحت تأثیر مدل سرعتی به‌کار رفته، مکان زمین‌لرزه و موقعیت ایستگاه‌ها است، وارون‌سازی خطی شکل موج‌ها صورت می‌گیرد و شکل موج‌های اصلی با نگاشت‌های مصنوعی محاسبه شده مطابقت داده می‌شوند و میزان کاهش واریانس<sup>(۳)</sup> محاسبه می‌شود.



شکل ۳- شش تانسور گشتاور پایه برای محاسبه تانسور گشتاور در الگوریتم ایزولا

در طول قطعات گسلی سازنده گسل پیشانی کوهستان، نشانگر تمرکز رومرکز زمین‌لرزه‌ها در محل انقطاع اثر محوری چین‌ها در سطح زمین است. به‌عبارت‌دیگر، به نظر می‌رسد که کانون زمین‌لرزه‌ها در مجاورت نبوده‌های بین قطعه‌ای، قطعات گسلی پی سنگی سازنده گسل پیشانی کوهستان قرار دارند. سازوکار ژرفی این زمین‌لرزه‌ها عمدتاً یک رانندگی را با صفحات گریه موازی با ساختارهای زمین‌شناختی و گسل پیشانی کوهستان نشان می‌دهند [۴]. از نظر نوزمین‌ساختی، زاگرس چین‌خورده، در اثر حرکت رو به شمال صفحه عربستان و برخورد آن با صفحه ایران، در راستای شمال‌خاوری-جنوب باختری فشرده می‌شود. به همین دلیل، در حال حاضر زاگرس تحت تأثیر دگرشکلی ناشی از فشارهای زمین‌ساختی با روند NNE-SSW، به همراه همگرایی و برخورد قاره‌ای، قرار دارد. دگرشکلی‌ها هم‌راستای ساختارها و شکستگی‌های آلپی، (NW-SE)، و پیش از آلپی، (N-S)، هستند. از این رو، عملکرد مشترک این دو، بر روی هم، باعث برآیند نوزمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی و در نتیجه لرزه‌خیزی کنونی زاگرس می‌شود [۱].

زاگرس از دیدگاه زلزله‌خیزی بسیار فعال و زلزله‌خیزترین منطقه ایران است. بیش از ۵۰ درصد زمین‌لرزه‌های ایران، که به‌وسیله شبکه‌های جهانی به ثبت رسیده‌اند، در گستره زاگرس روی داده است و این زمین‌لرزه‌ها در تمامی پهله زاگرس، به طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر، روی می‌دهند [۸]. اگرچه زمین‌لرزه‌های نیمه عمیق (بین ۷۰ تا ۳۰۰ کیلومتر)، در مناطق برخورد قاره‌ای می‌توانند بین زمین‌لرزه‌های کم‌عمق (عمق کانونی کمتر از ۷۰ کیلومتر)، به‌صورت پراکنده اتفاق بیفتند [۱۰]، اما به نظر می‌رسد لرزه‌خیزی در زاگرس از نوع کم‌عمق است، هرچند اظهارات مغایری نیز وجود دارد [۹]. از دیدگاه زمین‌شناسی نیز، زاگرس منطقه وسیعی است که به‌طور پیوسته، دگرشکلی فشاری و کوتاه شدگی پی‌سنگ در روی گسل‌های نرمال که فعالیت مجدد یافته‌اند را تجربه می‌کند [۳]. این نظریه با حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های زاگرس که گسلش معکوس نسبتاً بزرگ زاویه (۴۰ تا ۵۰ درجه) در تمامی پهله‌های گستره زاگرس را نشان می‌دهند، حمایت می‌شود.

1. Elementry Moment Tensors

2. Least-Squares

3. Variance Reduction

بر اساس طیف دامنه سیگنال و نویز محاسبه می‌شود که پس از انتخاب پنجره زمانی سیگنال در نرم‌افزار، پنجره زمانی نوفه به‌طور خودکار با طولی یکسان با پنجره زمانی سیگنال تعیین می‌شود به‌طوری‌که انتهای پنجره نوفه ابتدای پنجره سیگنال است. در نهایت طیف دامنه پس از هموارسازی برای هر دو پنجره تعیین شده و برای هر مؤلفه از نگاشت ترسیم می‌شود. باند فرکانسی فیلتر میان‌گذر اعمالی به‌وسیله چهار مقدار  $f_1$ ،  $f_2$ ،  $f_3$  و  $f_4$  تعیین می‌شود [۱۲]. جدول (۴) باند فرکانسی بهینه شده برای داده‌های فیلترشده هر یک از چهار زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. به‌منظور کسب اطمینان از پایداری جواب به‌دست آمده، وارون‌سازی برای داده‌های فیلترشده در سایر باندهای فرکانسی دیگر نیز انجام گرفت و تغییر محسوسی در تانسور گشتاور محاسبه‌شده ایجاد نشد.

### نتیجه‌های وارون‌سازی

محاسبه تانسور گشتاور و تعیین مکان بهینه مرکزوار در این مطالعه شامل دو مرحله بود؛ مرحله اول، تغییرات مکان افقی چشمه ثابت نگه داشته شد و وارون‌سازی شکل موج شد و عمق بهینه برای مرکزوار جست‌وجو شد. شکل (۵) همبستگی بین شکل‌موج‌های اصلی و مصنوعی را برحسب عمق برای چهار زمین‌لرزه اصلی نشان می‌دهد. عمق بهینه مرکزوار برای این چهار زمین‌لرزه به ترتیب ۱۲، ۸، ۹ و ۱۰ به دست آمد. در مرحله دوم، مکان مرکزوار در یک صفحه افقی شامل شبکه‌ای از نقاط جست‌وجو در جهت امتداد و شیب در عمق بهینه به‌دست آمده پس از انجام آزمون‌های مختلف با شبکه‌بندی‌های مختلف برای هر زمین‌لرزه جست‌وجو شد (شکل ۶). شکل (۷) مقایسه شکل‌موج جابه‌جایی مشاهده‌ای با شکل موج‌های مصنوعی و شکل (۸) سازوکار کانونی تعیین شده در این مطالعه را برای چهار زمین‌لرزه رخ داده در اوایل آذرماه ۱۳۹۲ در گستره کرمانشاه با استفاده از الگوریتم ISOLA نشان می‌دهد.

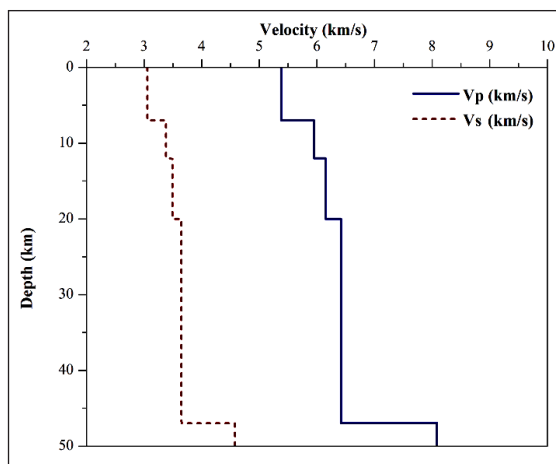
جدول ۴- باند فرکانسی بهینه شده برای فیلتر میان‌گذر اعمالی به داده‌ها

Case No.	Date	Origin time (UTC)	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)	$f_4$ (Hz)
۱	۲۰۱۳-۱۱-۲۲	۰۶:۵۱:۲۴.۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶
۲	۲۰۱۳-۱۱-۲۲	۱۸:۳۰:۵۷.۵	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶
۳	۲۰۱۳-۱۱-۲۳	۲۳:۲۶:۲۰.۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۸
۴	۲۰۱۳-۱۱-۲۴	۱۸:۰۵:۴۲.۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶

در این مطالعه از ساختار سرعتی ارائه شده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IGUT) که در جدول (۳) نمایش استفاده شد. شکل (۴) ساختار سرعتی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد داده شده است. در انتخاب باند فرکانسی فیلتر میان‌گذر اعمالی به داده‌ها و نگاشت‌های مناسب نسبت سیگنال به نوفه (SNR) خوب بسیار مهم است. این نسبت

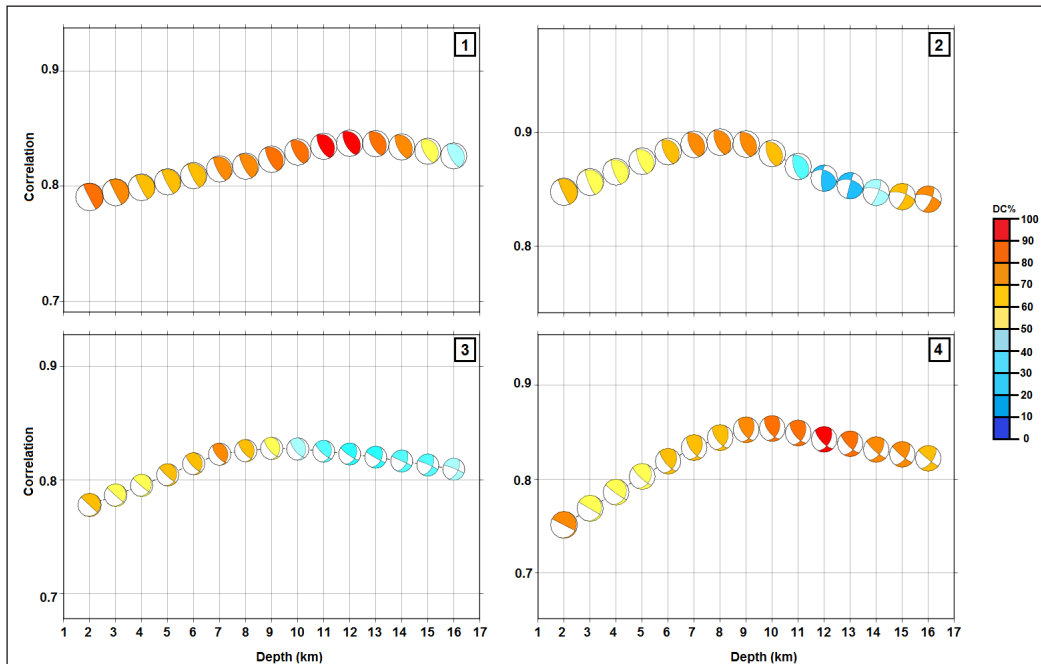
جدول ۳- ساختار سرعتی مورد استفاده در این مطالعه (ارایه شده توسط مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران)

depth of layer (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
۰	۵/۳۸	۳/۰۵۷	۲/۷۷۶
۷	۵/۹۵	۳/۳۸۱	۲/۸۹
۱۲	۶/۱۵	۳/۴۹۴	۲/۹۳
۲۰	۶/۴۲	۳/۶۴۸	۲/۹۸۴
۴۷	۸/۰۶	۴/۵۸	۳/۳۱۲

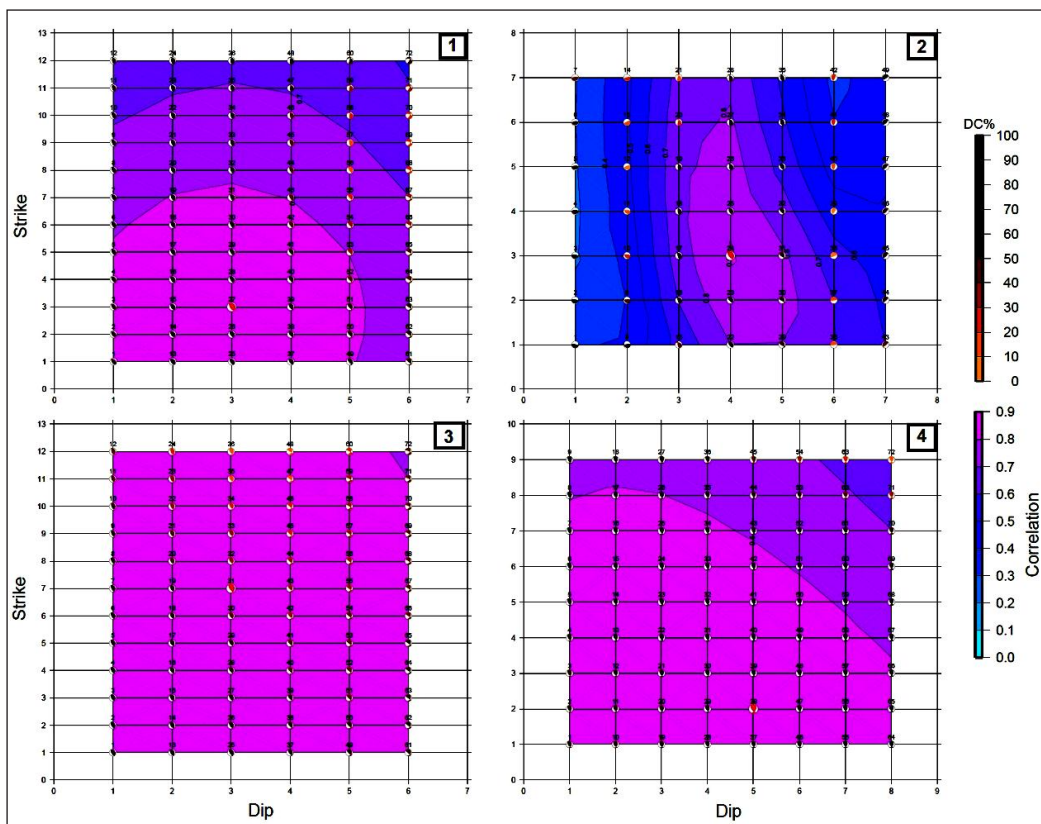


شکل ۴- نمایش ساختار سرعتی مورد استفاده (IGUT) در این مطالعه

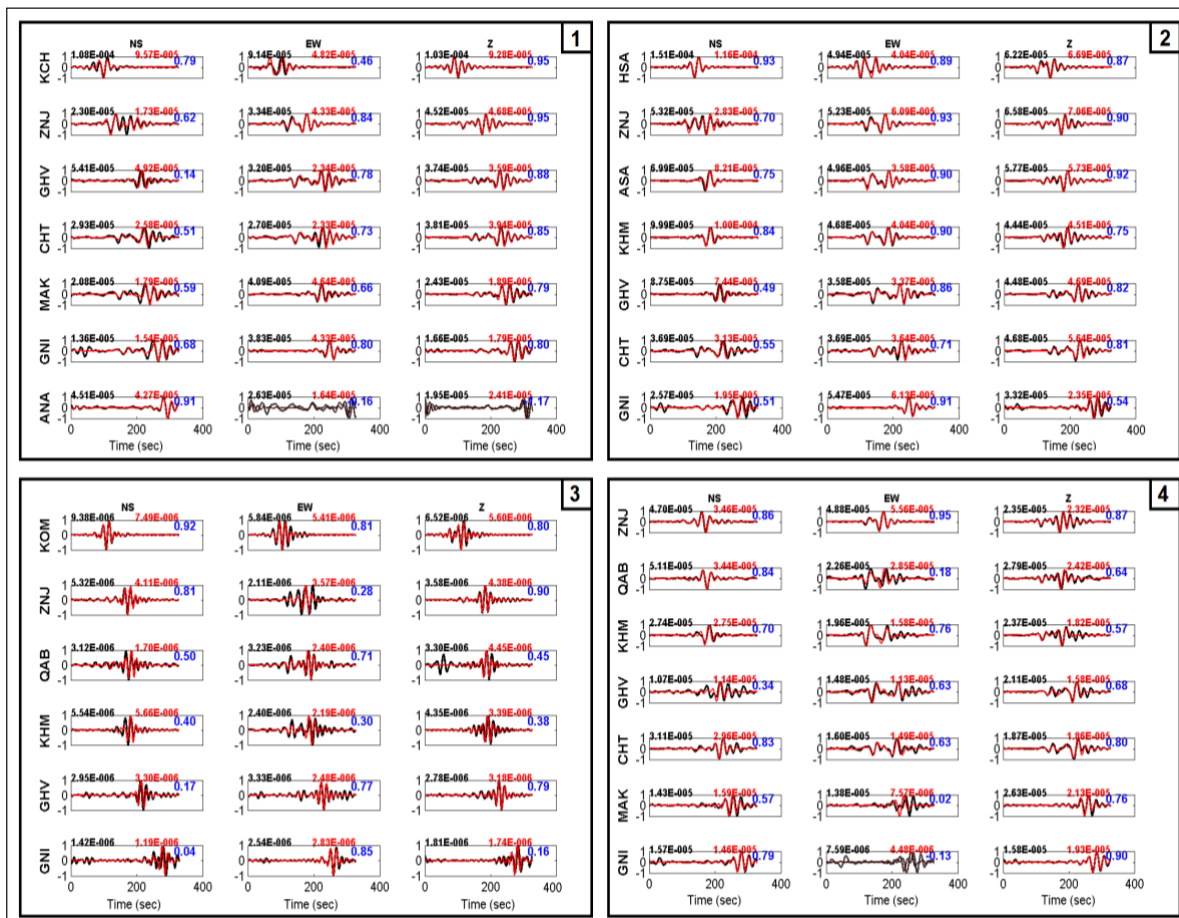




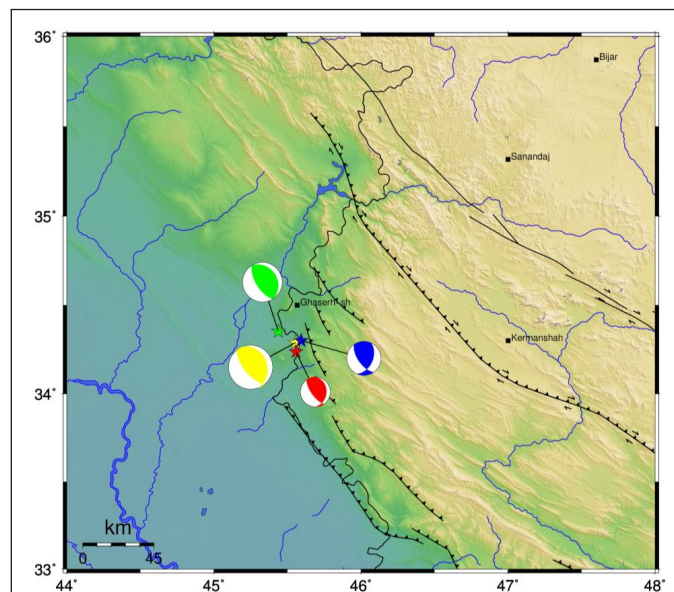
شکل ۵- نمودار همبستگی برحسب عمق‌های مرکزوار برای چهار زمین‌لرزه اصلی رخ داده در گستره کرمانشاه



شکل ۶- مکان مرکزوار بهینه برای چهار زمین‌لرزه اصلی رخ داده در گستره کرمانشاه












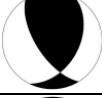
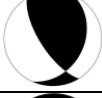
شکل ۷- مقایسه شکل موج‌های جابه‌جایی مشاهده‌ای برای چهار زمین‌لرزه رخ داده در گستره کرمانشاه (شکل موج‌های مشکی‌رنگ) با شکل موج‌های مصنوعی (شکل موج‌های قرمز رنگ) به‌دست آمده از برگردان تانسور گشتاور در حوزه زمان.



شکل ۸- سازوکارهای کانونی به‌دست آمده در این مطالعه برای چهار زمین‌لرزه اصلی رخ داده در گستره کرمانشاه، رویدادهای اول تا چهارم به ترتیب با ستاره‌های سبز، زرد، قرمز و آبی‌رنگ و سازوکار کانونی مربوط به هر یک نیز با همان رنگ مشخص شده‌اند.

میزان کاهش واریانس برای چهار زمین‌لرزه رخ داده به ترتیب، ۰٫۷۱، ۰٫۸۲، ۰٫۷ و ۰٫۷۴ محاسبه شده است. در جدول (۵) نتیجه‌های به‌دست آمده از این مطالعه و همچنین سازوکار کانونی تعیین شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IGUT) و تانسور گشتاور مرکزوار هاروارد (HCMT) مقایسه شده است. طبق نتیجه‌های به‌دست آمده از این مطالعه، برگردان تانسور گشتاور برای این چهار زمین‌لرزه، لغزش معکوس با کمی مؤلفه امتدادلغز را نشان می‌دهد. گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده  $۲٫۴ \times ۱۰^{۱۷}$ ،  $۳٫۳ \times ۱۰^{۱۶}$ ،  $۱٫۱ \times ۱۰^{۱۶}$

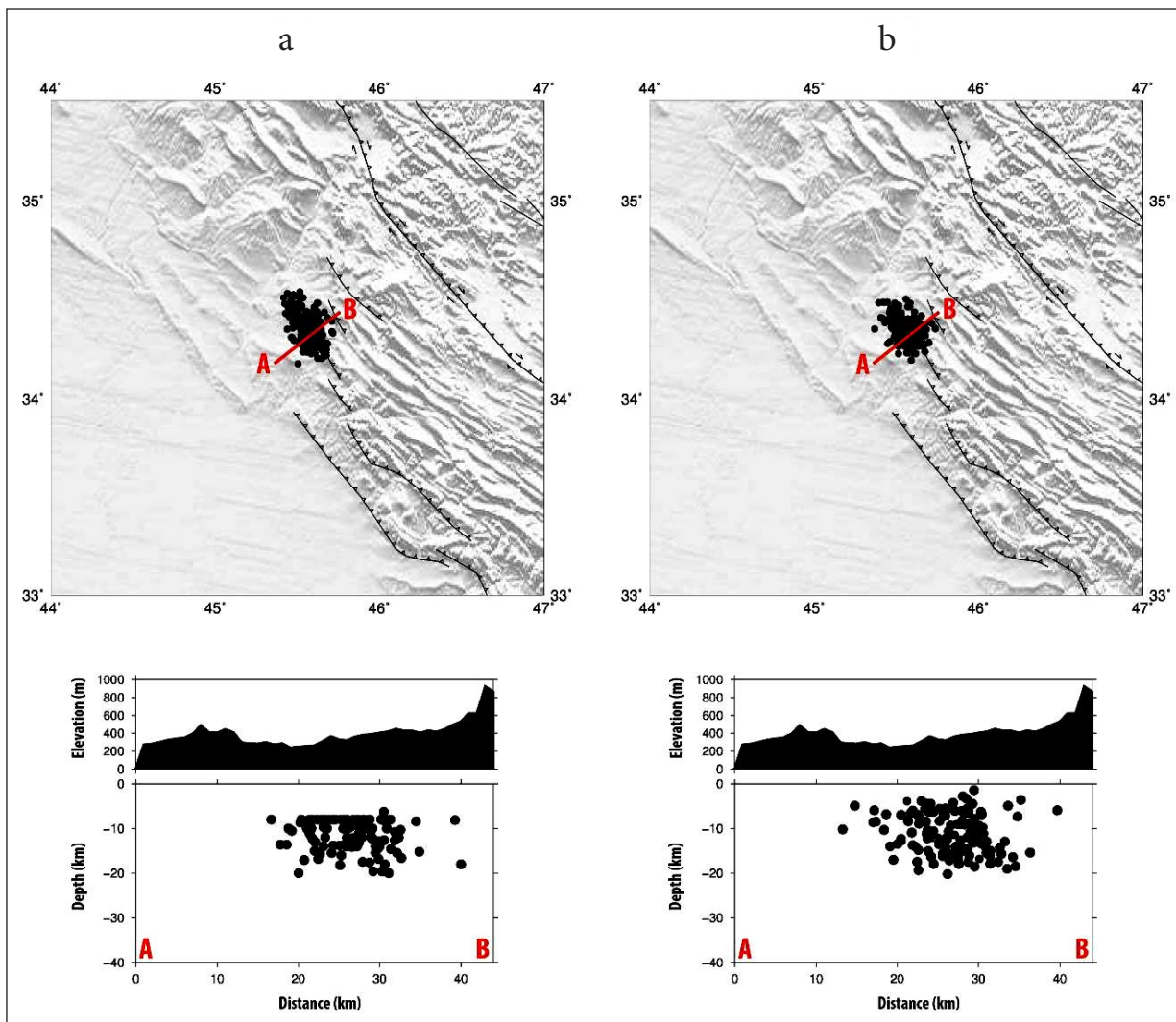
جدول ۵- مقایسه سازوکارهای کانونی به‌دست آمده در این مطالعه برای چهار زمین‌لرزه اصلی رخ داده در گستره کرمانشاه با مراجع IGUT و Harvard CMT

Event No.	Reference	Stike ۱	Dip ۱	Rake ۱	Stike ۲	Dip ۲	Rake ۲	Centroid Depth (km)	M <sub>w</sub>	Beachball
۱	IGUT	۱۴۹	۷۰	۱۰۰	۳۰۲	۲۲	۶۵	۹	۵٫۶	
	HCMT	۱۳۹	۶۸	۸۲	۳۳۹	۲۴	۱۰۹	۱۲٫۷	۵٫۷	
	ISOLA (this study)	۱۴۸	۶۴	۹۰	۳۲۷	۲۶	۸۹	۱۲	۵٫۵	
۲	IGUT	۱۳۹	۶۵	۸۲	۳۳۷	۲۶	۱۰۶	۱۰	۵٫۷	
	CMT	۱۳۴	۶۲	۶۸	۳۵۴	۳۵	۱۲۵	۱۲	۵٫۷	
	ISOLA (this study)	۱۴۱	۶۶	۸۱	۳۴۲	۲۵	۱۰۹	۸	۵٫۶	
۳	IGUT	۱۶۵	۵۸	۹۲	۳۴۱	۳۲	۸۶	۱۰	۴٫۷	
	CMT	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ISOLA (this study)	۱۴۴	۶۹	۷۳	۳	۲۷	۱۲۶	۹	۴٫۶	
۴	IGUT	۱۴۸	۶۴	۵۳	۲۷	۴۴	۱۴۰	۱۰	۵٫۵	
	CMT	۱۶۰	۵۴	۶۹	۱۳	۴۱	۱۱۶	۱۵٫۴	۵٫۵	
	ISOLA (this study)	۱۴۵	۶۲	۵۱	۲۵	۴۷	۱۴۰	۱۰	۵٫۴	



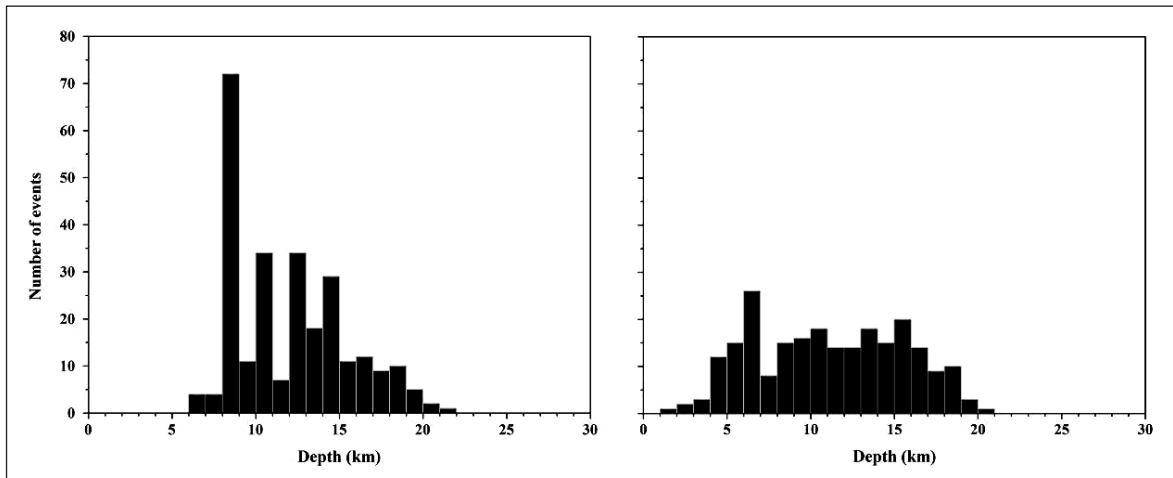
به خوبی بین عمق‌های ۷ تا ۱۷ کیلومتر نشان می‌دهد، به نحوی که این جمع‌شدگی را در نقشه رومرکز زمین‌لرزه‌های مکان‌یابی مجدد شده را با شیفت مکانی زمین‌لرزه‌ها به سمت مرکز این خوشه زمین‌لرزه‌ای می‌توان مشاهده کرد. با توجه به مقطع عرضی AB در شکل ۹ مشاهده می‌شود که خطی‌شدگی عمقی زمین‌لرزه‌ها در مقطع مربوط به مکان‌یابی اولیه (شکل ۹a) در عمق ۸ کیلومتر، در مکان‌یابی مجدد به وسیله الگوریتم hypoDD به چشم نمی‌خورد و توزیع عمقی خوبی را از نزدیکی سطح تا عمق حدوداً ۲۰ کیلومتر نشان می‌دهد (شکل ۹b).

و  $1.5 \times 10^{17}$  نیوتن‌متر است که بزرگی‌های گشتاوری ( $M_w$ ) ۵٫۵، ۵٫۶، ۴٫۶ و ۵٫۴ را برای این چهار زمین‌لرزه، نتیجه می‌دهد. رومرکز خردزمین‌لرزه‌های رخ داده از ابتدای رخداد زمین‌لرزه اصلی اول یعنی در ۲۲ نوامبر ۲۰۱۳ تا پایان سال ۲۰۱۳ به وسیله روش نسبی اختلاف زمانی دوگانه<sup>(۱)</sup> و الگوریتم hypoDD [۱۴] با استفاده از مدل سرعتی IGUT مکان‌یابی مجدد شدند (شکل ۹). میانگین RMS باقی‌مانده زمان‌سیرها از ۰٫۳۸ ثانیه به ۰٫۰۹ ثانیه در مکان‌یابی مجدد کاهش یافت. مکان‌یابی مجدد توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها را به خوبی بهبود بخشیده و تمرکز لرزه‌خیزی را



شکل ۹- رومرکز خردزمین‌لرزه‌ها در گستره مورد مطالعه و مقطع عرضی (AB):  
(a) قبل از مکان‌یابی مجدد و (b) بعد از مکان‌یابی مجدد به وسیله الگوریتم hypoDD

#### 1. Double-Difference



شکل ۱۰- هیستوگرام‌های فراوانی توزیع عمقی زمین‌لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه قبل از مکان‌یابی مجدد (چپ) و پس از مکان‌یابی مجدد با استفاده از الگوریتم hypoDD (راست).

نیوتن‌متر است که بزرگی‌های گشتاوری ( $M_w$ ) ۵٫۵، ۵٫۶، ۴٫۶ و ۵٫۴ را برای این چهار زمین‌لرزه، نتیجه می‌دهد. میزان کاهش واریانس برای چهار زمین‌لرزه رخ داده به ترتیب، ۰٫۷۱، ۰٫۸۲، ۰٫۷ و ۰٫۷۴ محاسبه شده است. مکان‌یابی مجدد زمین‌لرزه‌ها و مقطع عرضی AB (شکل ۹b) و هم‌چنین سازوکارهای به‌دست آمده، نشان می‌دهد که به‌احتمال زیاد، فعالیت شاخه‌های شمال‌غربی سامانه گسلی پیشانی کوهستان زاگرس (MFF) مسبب رویداد این زمین‌لرزه‌ها در گستره کرمانشاه بوده است که دارای روند کلی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شیب تقریبی شمال‌شرقی است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، سازوکار کانونی چهار زمین‌لرزه رخ داده در اوایل آذرماه ۱۳۹۲ در گستره کرمانشاه با بزرگی  $M_w < 4$  توسط الگوریتم ISOLA و از طریق برگردان خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان تعیین شدند (شکل ۸). طبق نتیجه‌های به‌دست آمده از این مطالعه، برگردان تانسور گشتاور برای این چهار زمین‌لرزه، لغزش معکوس با کمی مؤلفه امتداد لغز را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۵)، عمق مرکزوار محاسبه شده برای این چهار زمین‌لرزه به ترتیب ۱۲، ۸، ۹ و ۱۰ کیلومتر به‌دست آمده است. گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده  $۱۰^{۱۷} \times ۲٫۴$ ،  $۱۰^{۱۷} \times ۳٫۳$ ،  $۱۰^{۱۶} \times ۱٫۱$  و  $۱۰^{۱۷} \times ۱٫۵$

### مراجع

- [۱] آقاناتی، س. ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران. ۵۸۶، انتشارات سازمان زمین‌شناسی ایران، تهران.
- [۲] یمینی‌فرد، ف.، ۱۳۹۱، پارامترهای چشمه زمین‌لرزه ۲۵ مهرماه ۱۳۸۸ ری- تهران، با بزرگی گشتاوری ۴٫۳، مجله ژئوفیزیک ایران، شماره ۳، ۴۶-۵۸.
- [3] Berberian, M., (1981), Active faulting and tectonics of Iran; Zagros, Hindu kush, Himalaya, Geodynamic Evolution, Am. Geophys. Union and Geol. Soc. Am. Geodyn. Series, 3, 33- 69.
- [4] Berberian, M., (1995), Master “blind” thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, Tectonophysics, 241, 193-224.
- [5] Bouchon, M., (1981), A simple method to calculation green’s function for elastic layered media, Bull. seism. Soc. Am., 71, 959-971.

- [6] Das, S. and Kostrov, B.V., (1990), Inversion for seismic slip rate and distribution with stabilizing constraints: Application to the 1986 Andreanof Islands earthquake, *J. Geophys. Res.*, 95, 6899–6913.
- [7] Kikuchi, M. and Kanamori, H., (1991), Inversion of complex body waves-III, *Bull. seism. Soc. Am.*, 81, 2335-2350.
- [8] Mirzaei, N., Mengtan, G. and Yuntai, C., (1998), Seismic Source Regionalization for Seismic Zoning of Iran: Major Seismotectonic Provinces, *Journal of earthquake prediction research*, 7, 465-492.
- [9] Molnar, P. and Chen, W.P., (1982), Seismicity and mountain building, in: *mountain building Processes*, Hsued, K. J. (ed.), Academic Press, pp. 41-57.
- [10] Reiter, L., (1990), *Earthquake hazard analysis: issues and insights*, Columbia University Press, New York.
- [11] Sokos, E.N. and Zahradník, J., (2008), ISOLA a FORTRAN code and a MATLAB GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, *Comput. Geosci*, 34, 967–977.
- [12] Sokos, E.N. and Zahradník, J., (2013), Evaluating centroid moment tensor uncertainty in new version of ISOLA software. *Seismol. Res. Letters*, 84, 656-665.
- [13] Tape, W. and Tape, C., (2013), The classical model for moment tensors, *Geophys. J. Int.*, 195, 1701-1720.
- [14] Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L., (2000), A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California. *Bull. seism. Soc. Am.*, 90, 1353–1368.
- [15] Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E. and Tselentis, G.A., (2005), Iterative Deconvolution of Regional Waveforms and a Double-Event Interpretation of the 2003 Lefkada Earthquake, Greece, *Bull. seism. Soc. Am.*, 95, 159-172.



## Studying Source parameters of november 2013, earthquakes in kermanshah region

A. Rashidi<sup>1,\*</sup>, N. Moeini<sup>2</sup> and M.R. Gheitanchi<sup>3</sup>

1. MSc in Geophysics-Seismology, Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran
2. Associate Prof. of Geophysics-Seismology, Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran
3. Prof. of Geophysics-Seismology, Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran

Received: October 2014, Revised: December 2014, Accepted: January 2015

**Abstract:** In this study, focal mechanism of four earthquakes with  $M_w > 4.5$  which occurred in Kermanshah province on November 2013 is evaluated, using linear inversion of moment tensor in time domain by ISOLA algorithm. In this algorithm, iterative deconvolution is utilized for full waveform and the Green's function is calculated, using discontinuous wave-number method. Inversion of moment tensor for these four earthquakes, show reverse mechanism with strike slip component. The centroid depths for these four earthquakes are 12, 8, 9 and 10 kilometers and the calculated seismic moments are  $2.4 \times 10^{17}$ ,  $3.3 \times 10^{17}$ ,  $1.1 \times 10^{16}$  and  $1.5 \times 10^{17}$  Nm, respectively which result  $M_w=5.5$ ,  $M_w=5.6$ ,  $M_w=4.6$  and  $M_w=5.4$  for earthquake magnitudes. Variance reductions for these four earthquakes are 0.71, 0.82, 0.7 and 0.74. Relocation of small events, perpendicular cross section to them and obtained focal mechanisms confirm that the causative fault (or faults) of these four earthquakes is probably the northwestern branches of Mountain Front Fault System (MFF) which is located in Zagros seismotectonic province of Iran.

**Keywords:** Focal mechanism of earthquake, linear inversion of moment tensor, ISOLA algorithm, Kermanshah region, Relocation

\*Corresponding author Email: amin.rashidi@ut.ac.ir