

## تعیین پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ

### (MI ۶/۰) در حوزه زمان و فرکانس با استفاده از مجموعه‌ابزار KIWI

علیرضا نیک‌سجل<sup>۱</sup> و ظاهر حسین شمالی<sup>۲\*</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(دریافت: ۹۸/۳/۱۱، پذیرش نهایی: ۹۸/۱/۱)

#### چکیده

مجموعه ابزار (Kinematic Waveform Inversion) KIWI، یک روش جدید در تعیین سازوکار کانونی و پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های ناحیه‌ای است که در آن با انجام برگردان در دو حوزه زمان و فرکانس، پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده تعریف شده در مدل چشمه ایکونال (eikonal) طی فرآیندی مرحله‌ای تعیین می‌شود. هدف از این مطالعه، تعیین پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰) ضمن تشریح مراحل برگردان در مجموعه ابزار KIWI است. شکل موج‌های استفاده شده در این تحقیق برگرفته از ایستگاه‌های دائمی باندپهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و شبکه جهانی IRIS است. به منظور ارزیابی عملکرد مجموعه ابزار KIWI، فرآیند برگردان با استفاده از شش زیرگروه اطلاعاتی مختلف (شامل مدل پوسته IASP91، مدل پوسته میانگین ایران (IRSC) و داده‌های مذکور) انجام شده که در این بین مجموعه متشکل از مدل سرعتی IRSC و کل داده‌های موجود به‌عنوان مجموعه اطلاعاتی بهینه در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از برگردان با استفاده از مجموعه اطلاعاتی بهینه بیانگر جنبش عمدتاً معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌گرد با شیب به‌سمت شمال‌شرق است که با مشخصات گسل کشف‌رود همخوانی دارد. پارامترهای چشمه نقطه‌ای نظیر عمق مرکزوار و بزرگای گشتاوری زمین‌لرزه به ترتیب ۷/۱ کیلومتر و ۶/۲ به‌دست آمد. برگردان پارامترهای چشمه گسترده نیز نتایجی چون جهت‌یافتگی عمدتاً یک طرفه به‌سمت جنوب شرق، مدت‌زمان شکست ۹/۳ ثانیه، مساحت شکست ۳۰۰ کیلومتر مربع و نیز میانگین لغزش ۱۶ سانتی‌متر را به‌دست داده است.

واژه‌های کلیدی: مجموعه ابزار KIWI، برگردان چند مرحله‌ای در حوزه زمان و فرکانس، پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده، زمین‌لرزه سفیدسنگ (MI ۶/۰).

#### ۱. مقدمه

مطالعه چشمه لرزه‌ای و شناخت خصوصیات آن، از آنجایی که امکان درک دینامیک زمین‌لرزه را برای ما فراهم می‌سازد، از اهمیت بسیار زیادی در علم زلزله‌شناسی برخوردار است. بر همین اساس، ایجاد و توسعه روش‌های تعیین سریع و خودکار پارامترهای چشمه نقطه‌ای زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ به‌طور چشم‌گیری در دهه‌های اخیر در دستور کار قرار گرفته و موجب فراهم شدن روزافزون روش‌های تعیین سازوکار کانونی و پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌ها در مؤسسات مختلف شده است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). از جمله روش‌های توسعه یافته اخیر می‌توان به رویکرد سیسکا و همکاران (۲۰۰۶) اشاره کرد. آنها با توسعه روشی که تحلیل در حوزه زمان و فرکانس را ادغام می‌کند، توانستند پایداری مطالعات مربوط به چشمه زمین‌لرزه‌های محلی و ناحیه‌ای را بهبود بخشند. همچنین آنها نشان دادند که این روش در صورت عدم وجود مدل پوسته دقیق، گپ آزمون‌ی بالایی ایستگاه‌ها و یا نیاز به اعمال فرکانس‌های بالاتر در فرآیند برگردان، نسبت به سایر روش‌های برگردان در حوزه زمان عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می‌دهد (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲). مجموعه ابزار KIWI (Kinematic Waveform Inversion) یک روش عددی نوین با ساختاری به‌هم پیوسته است که اخیراً با همکاری

مطالعه چشمه لرزه‌ای و شناخت خصوصیات آن، از آنجایی که امکان درک دینامیک زمین‌لرزه را برای ما فراهم می‌سازد، از اهمیت بسیار زیادی در علم زلزله‌شناسی برخوردار است. بر همین اساس، ایجاد و توسعه روش‌های تعیین سریع و خودکار پارامترهای چشمه نقطه‌ای زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ به‌طور چشم‌گیری در دهه‌های اخیر در دستور کار قرار گرفته و موجب فراهم شدن روزافزون روش‌های تعیین سازوکار کانونی و پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌ها در مؤسسات مختلف شده است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). از جمله روش‌های توسعه یافته اخیر می‌توان به رویکرد سیسکا و همکاران

مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه هامبورگ، مؤسسه فدرال علوم زمین و منابع طبیعی و مرکز تحقیقات جغرافیایی پوتسدام (Potsdam) و در قالب دستاورد پروژه KINHERED (پروژه‌ای جهت بهبود و خودکارسازی روش‌های مطالعه چشمه حرکتی (kinematic) زمین‌لرزه‌ها) جهت برگردان تانسور ممان ایجاد شده است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). در این مجموعه ابزار که از روش توسعه یافته توسط سیسکا و همکاران (۲۰۰۶) بهره می‌برد، از مدل چشمه ایکونال جهت توصیف چشمه نقطه‌ای و گسترده استفاده شده است (هیمن و همکاران، ۲۰۰۸). در این مدل که تعریفی ساده شده از چشمه را در اختیار ما قرار می‌دهد، چشمه نقطه‌ای توسط ۸ پارامتر و چشمه گسترده نیز به صورت مجموعه‌ای از چشمه‌های نقطه‌ای و با استفاده از ۵ پارامتر توصیف شده است. در شکل ۱، پارامترهای تعریف شده در مدل ایکونال جهت توصیف چشمه‌های نقطه‌ای و گسترده آورده شده است.

در مجموعه ابزار KIWI، به منظور پایداری سازی فرآیند برگردان، کاهش تعداد پارامترهای مورد مطالعه و نیز بهره‌بردن از مزایای برگردان در حوزه فرکانس (عدم وابستگی به شیفیت زمانی داده‌ها و امکان تخمین دقیق عمق زمین‌لرزه‌های کوچک) و زمان (تعیین بخش‌های کششی و فشارشی سازوکار کانونی با استفاده از اطلاعات مربوط به فاز)، فرآیند برگردان در سه مرحله مرتبط با هم و در حوزه‌های فرکانس (برازش طیف دامنه لرزه‌نگاشت‌ها) و زمان (برازش داده‌های زمانی) انجام گرفته و امکان تعیین دقیق و خودکار پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده، برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای گشتاوری بیش از ۵/۵، به وجود آمده است. علاوه بر این، قابلیت‌هایی نظیر امکان پیاده‌سازی ساده جهت انجام خودکار برگردان، تعیین سریع جهت‌یافتگی چشمه (directivity effect)، استفاده از الگوریتم‌های مختلف برگردان، اعمال پهنه‌های فرکانسی مختلف در مراحل سه‌گانه و نیز استفاده از بخش‌های مختلف لرزه‌نگاشت‌ها جهت پیش‌برد فرآیند برگردان از دیگر ویژگی‌های این

مجموعه ابزار به‌شمار می‌رود.

با توجه به به‌کارگیری توابع گرین (Green's Functions) از پیش ساخته شده، سرعت فرآیند برگردان در این مجموعه ابزار به‌طور چشم‌گیری بهبود یافته و زمان صرف شده نسبت به سایر روش‌های معمول کاهش پیدا کرده است. همچنین، استفاده از مدل ایکونال و رویکرد برگردان چند مرحله‌ای در حوزه‌های زمان و فرکانس، موجب پایداری هرچه بیشتر فرآیند برگردان و رفع محدودیت‌های مربوط به عمق (با توجه به محدودیت‌های ذاتی موجود در مطالعه زمین‌لرزه‌های سطحی با عمق کمتر از ۱۵ کیلومتر، تعیین عمق این رویدادها با عدم قطعیت بالایی همراه خواهد بود) و بزرگای زمین‌لرزه مورد مطالعه (بزرگای گشتاوری بیش از ۵/۵) موجود در اغلب روش‌های برگردان شده است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). در ادامه سعی بر آن شده است تا علاوه بر تشریح مراحل برگردان در این مجموعه ابزار، پارامترهای چشمه نقطه‌ای و گسترده زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ سفیدسنگ-فریمان با بزرگای محلی ۶/۰ مطالعه شود.

## ۲. تکنونیک و لرزه‌خیزی منطقه

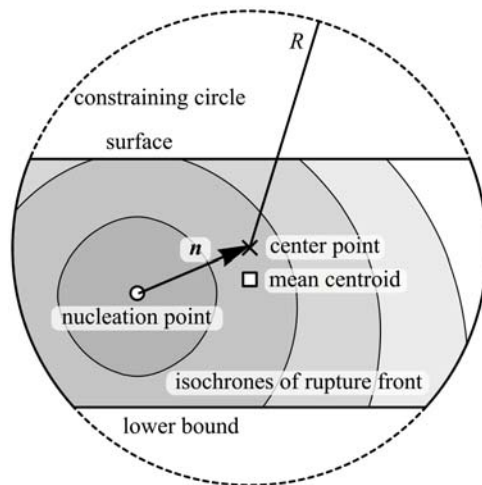
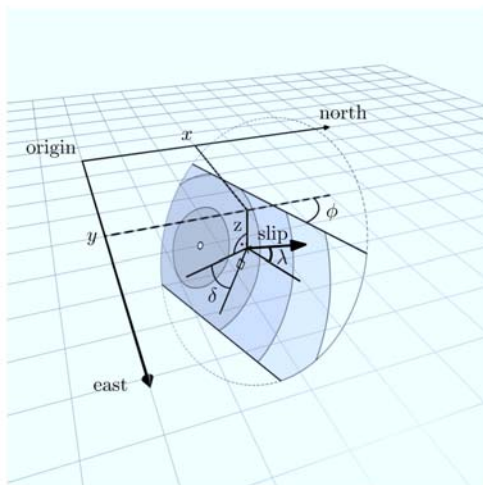
بخش شمال شرقی صفحه تکنونیک ایران، واقع در شرق زون تصادم صفحات اوراسیا-عربستان (جکسون و مکنزی، ۱۹۸۴، جکسون و مکنزی، ۱۹۸۸، جکسون، ۱۹۹۲)، شاهد همگرایی شمالی-جنوبی پوسته مابین بلوک لوت و ایران مرکزی و صفحه توران است. بیشترین میزان این همگرایی ناشی از کوتاه‌شدگی پوسته مابین رشته‌کوه‌هایی با راستای شمال غربی-جنوب شرقی، مانند کوه‌های سرخ، بینالود و کپه داغ می‌باشد (سو و همکاران، ۲۰۱۹). گستره خراسان در ایالت تکنونیک کپه‌داغ و ایران مرکزی (میرزایی، ۱۳۸۳) قرار دارد که بخش شمالی و مرکزی آن شامل کوه‌های کپه‌داغ و قسمتی از کوه‌های بینالود است. وجود گسل‌های مهمی نظیر کشف‌رود، بینالود، نیشابور و درونه این منطقه را از لحاظ تکنونیک و لرزه‌خیزی حائز

شرقی شهر فریمان و در نزدیکی روستای سفیدسنگ واقع در استان خراسان رضوی به وقوع پیوست. طبق گزارش مقدماتی منتشر شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC)، این زمین‌لرزه در فاصله ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد رخ داده است. بر اساس این گزارش، به فاصله ۶ ساعت پس از این زمین‌لرزه، که به نوعی بزرگ‌ترین زلزله رخ داده در شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر مشهد از سال ۱۹۰۰ میلادی تاکنون به حساب می‌آید (بررسی انجام شده در سایت مؤسسات تحقیقاتی زلزله، [http://ds.iris.edu/wilber3/find\\_event](http://ds.iris.edu/wilber3/find_event)، بیش از ۷۰ پس‌لرزه توسط ایستگاه‌های لرزه‌نگاری مرکز لرزه‌نگاری کشوری به ثبت رسیده است که ۳۴ مورد از آنها بزرگایی بین ۳/۰ تا ۴/۰ در مقیاس ناتلی داشته‌اند. همچنین رومرکز این زمین‌لرزه در مختصات ۳۵/۸۵ درجه شمالی و ۶۰/۳۴ درجه شرقی و عمق چشمه و مرکزوار آن ۶/۰ کیلومتر گزارش شده است (سایت مرکز لرزه‌نگاری کشوری، [irsc.ut.ac.ir](http://irsc.ut.ac.ir)).

اهمیت می‌کند. در میان گسل‌های مهم منطقه، گسل کشف‌رود نزدیک‌ترین گسل به رومرکز زمین‌لرزه مورد مطالعه است که دو زمین‌لرزه ۳۰ ژوئیه ۱۶۷۳ میلادی مشهد به بزرگای ۶/۶ (مقیاس امواج سطحی) و آوریل ۱۶۸۷ مشهد به بزرگای ۵/۵ (مقیاس امواج سطحی) به سبب جنبش این گسل رخ داده‌اند (بربریان، ۱۹۸۱). این گسل با طول حدود ۱۲۰ کیلومتر و راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق، از جنوب شرق شهر قوچان تا جنوب شرق شهر مشهد امتداد دارد. سازوکار این گسل معکوس، شیب آن در راستای شمال شرق و از لحاظ لرزه‌خیزی گسلی فعال محسوب می‌شود (آقاباتی، ۱۳۸۳).

۳. زمین‌لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ سفیدسنگ-فریمان با بزرگای محلی ۶/۰

صبح روز پنجم ماه آوریل سال ۲۰۱۷ (۱۶ فروردین ۱۳۹۶) ساعت ۱۰ و ۳۹ دقیقه و ۸ ثانیه به وقت محلی، زمین‌لرزه‌ای به بزرگای ۶/۰ در مقیاس محلی در شمال



شکل ۱. پارامترهای چشمه گسترده (راست) و نقطه‌ای (چپ) تعریف شده در مدل چشمه ایکونال (برگرفته از هیمن، ۲۰۱۱). در شکل سمت چپ، امتداد، شیب، زاویه بردار لغزش و مشخصات مکانی و زمانی چشمه به‌عنوان پارامترهای چشمه نقطه‌ای تعریف شده‌اند. در شکل سمت راست، نمونه‌ای از یک چشمه گسترده نمایش داده شده است که در آن nucleation point، بیانگر مکان آغاز شکست چشمه گسترده به‌دست آمده در مرحله سوم برگردان، center point، مکان چشمه نقطه‌ای ورودی به نرم‌افزار، mean centroid، مرکزوار چشمه نقطه‌ای، R، شعاع شکست چشمه گسترده و خطوط منحنی بیانگر جبهه هم شکست می‌باشد. در این مدل با توجه به محل قرارگیری چشمه، سطح شکست توسط مرز لایه‌های درون زمین (در این شکل مرز هوای آزاد و مرز موهو) محدود می‌شود.

#### ۴. روش تحقیق

##### ۴-۱. داده‌ها

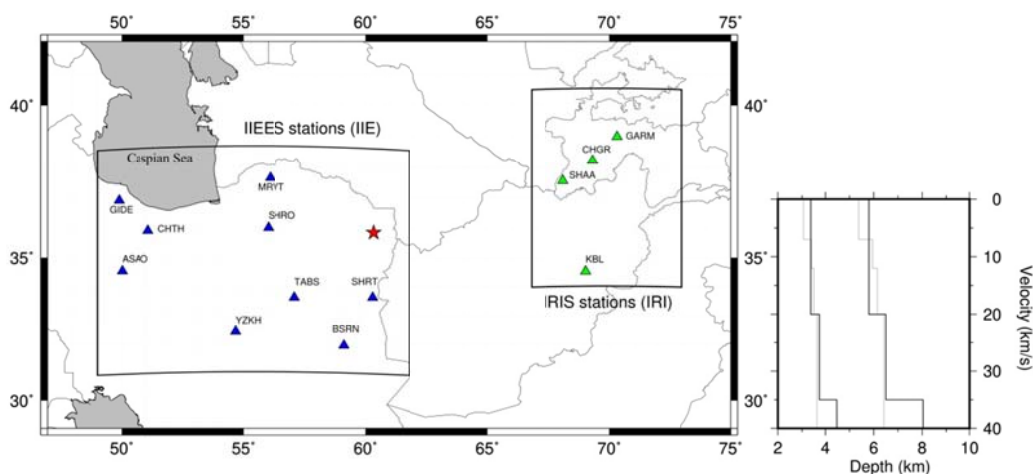
با توجه به این که در مجموعه ابزار KIWI مراحل اول و سوم برگردان در حوزه فرکانس انجام شده و در مرحله دوم نیز پیش‌برد این فرآیند با برازش کل طول لرزه‌نگاشت‌ها و در حوزه زمان انجام می‌شود (به بخش ۲-۳ مراجعه شود)؛ در این تحقیق از مؤلفه‌های افقی و قائم لرزه‌نگاشت‌ها استفاده شده است تا در صورت عدم وجود و یا نامطلوب بودن یکی از مؤلفه‌های افقی یک ایستگاه بتوان از مؤلفه دیگر آن استفاده کرد. شکل موج‌های مورد استفاده در این تحقیق برگرفته از ایستگاه‌های دائم و باندپهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) و ایستگاه‌های باندپهن شبکه جهانی IRIS در فواصل ناحیه‌ای می‌باشد. در مجموعه ابزار KIWI نیازی به انجام پیش‌پردازش‌های خاص و پیچیده بر روی شکل موج‌ها نبوده و تمامی مراحل آماده‌سازی داده‌ها همانند اکثر روش‌های برگردان شامل حذف خطای میانگین (mean) و روند خطی (trend)، برداشتن پاسخ دستگاهی و تبدیل داده‌های اولیه به جابه‌جایی می‌باشد. در شکل ۲ موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده از هر دو شبکه مذکور نمایش داده شده است.

#### ۴-۲. تابع گرین

علم به تابع گرین در محدوده مختصات چشمه تا گیرنده به‌عنوان یک پیش‌نیاز اساسی در بسیاری از روش‌های موجود در زلزله‌شناسی مطرح شده است. در زمینه برگردان پارامترهای چشمه، از تابع گرین به‌منظور ایجاد داده‌های مصنوعی جهت مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود؛ حال آن‌که این توابع کاربردهای وسیعی در تکنیک‌های تصویرسازی و روش‌های برگردان چشمه دارد. تابع گرین، بر اساس فرضیات مدل مورد استفاده و نیز داده‌های تجربی به‌دست آمده، بیان‌کننده نحوه انتشار امواج از یک چشمه لرزه‌ای تحریک شده تا یک ایستگاه لرزه‌ای می‌باشد. مؤلفه  $n$  از جنبش زمین  $U$  در یک ایستگاه لرزه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد (آکی و ریچاردز، ۱۹۸۰):

$$U_n(t) = \int m_{pq} * G_{np,q} dA, \quad (1)$$

که در آن  $m_{pq}$  و  $G_{np,q}$  به‌ترتیب بیانگر مؤلفه‌های تانسور ممان (که به امتداد گسل و زاویه بردار لغزش بستگی دارد) و مشتقات فضایی تابع گرین (که وابستگی آن مربوط به ساختار پوسته و موقعیت مکانی ایستگاه ثبت‌کننده نسبت به چشمه می‌باشد) است.



شکل ۲. نام و موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده. ایستگاه‌های شبکه IIEES و IRIS به‌ترتیب با رنگ آبی و سبز و عبارات اختصاری IIE و IRI نمایش داده شده است. در سمت راست تصویر مدل پوسته‌های به‌کار برده شده در این تحقیق تا عمق ۴۰ کیلومتر نمایش داده شده است. خطوط مشکی و خاکستری به‌ترتیب بیانگر مدل پوسته IASP91 و IRSC می‌باشد.

بزرگای زمین‌لرزه و فاصله رومرکزی ایستگاه‌ها تعیین می‌شود. در نهایت، ۸ پارامتر نخست مدل ایکونال (پارامترهای چشمه نقطه‌ای) در دو مرحله اول برگردان و ۵ پارامتر باقی مانده (پارامترهای چشمه گسترده) در مرحله سوم به دست خواهد آمد.

#### ۳-۴-۱. مرحله اول، برگردان پارامترهای چشمه نقطه‌ای

##### در حوزه فرکانس

این مرحله از برگردان با یک تقریب اولیه از زمان و مکان وقوع زمین‌لرزه جهت تعیین پارامترهای چشمه نقطه‌ای آغاز می‌شود. لذا در این تحقیق، فرآیند تعیین محل مجدد با استفاده از مدل پوسته IRSC، نرم‌افزار (GFZ) Seiscomp3 و NonLinLocation (لوماکس و همکاران، ۲۰۰۰) و فازخوانی از ۱۱۳ ایستگاه مختلف انجام شد (طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۶۰/۳۵ و ۳۵/۸۳ درجه و عمق ۷/۰ کیلومتر). با توجه به مزایای برگردان در حوزه فرکانس و برازش طیف دامنه لرزه‌نگاشت‌ها نسبت به برگردان در حوزه زمان (عدم وابستگی فرآیند برگردان به شیفت زمانی داده‌ها و نیز امکان تخمین دقیق‌تر عمق زمین‌لرزه‌های کوچک) که به تفصیل در کارهایی چون رومانوویچ (۱۹۸۲)، دام و همکاران (۱۹۹۹) و سیسکا و همکاران (۲۰۰۶) به آن پرداخته شده است؛ در این مرحله، برگردان در حوزه فرکانس ترجیح داده شده است. در این تحقیق، به منظور پایدارسازی فرآیند برگردان و برازش بخش تخت طیف دامنه، با توجه به بزرگای زمین‌لرزه و فاصله رومرکزی ایستگاه‌ها و پس از چندین تکرار، یک صافی میان‌گذر فرکانس پایین (۰/۰۱ تا ۰/۰۴ هرتز) بر روی داده‌های جابه‌جایی اعمال شده و از کل لرزه‌نگاشت‌ها (whole trace) در فرآیند برگردان استفاده شد. آغاز پنجره زمانی مورد استفاده در هریک از ایستگاه‌ها به اندازه ۰/۱۵ طول آن قبل از زمان رسید موج P بوده و طول آن نیز با توجه به مقادیر میانگین جهانی سرعت امواج درونی و سطحی طبق رابطه (۲) تعیین می‌شود (سیسکا و هیمن، ۲۰۱۴):

انتگرال، در سطح A که بیانگر محیط وقوع لغزش است انجام گرفته و علامت \* نیز بیانگر هم‌امیخت (convolution) در حوزه زمان می‌باشد (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲).

محاسبه تابع گرین فرآیندی زمان‌بر است؛ لذا در مجموعه ابزار KIWI جهت کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت فرآیند برگردان در پردازش‌های برخط، از تابع گرین یک‌بعدی از پیش ساخته شده جهت ایجاد لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در فرآیند برگردان استفاده می‌شود. در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد مجموعه ابزار KIWI، با استفاده از مدل پوسته جهانی IASP91 و مدل پوسته میانگین ایران (مدل سرعتی مورد استفاده در مرکز لرزه‌نگاری کشوری جهت تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، (IRSC)) توابع گرین در یک شبکه مناسب از فاصله رومرکزی-عمق محاسبه و در دو بانک تابع گرین ذخیره شد. مدل سرعتی IRSC حاصل از میانگین‌گیری سرعت لایه‌های تقریباً مشابه در مطالعات صورت گرفته بر روی ساختار پوسته زمین در مناطق مختلف کشور است که بر اساس آن عمق متوسط موهو، سرعت موج Pn در موهو و نسبت  $Vp/Vs$  به ترتیب ۴۸ کیلومتر، ۸/۰۶ کیلومتر بر ثانیه و ۱/۷۶ می‌باشد.

#### ۳-۴-۲. مراحل انجام برگردان

در مجموعه ابزار KIWI، به منظور پایدارسازی فرآیند برگردان از طریق کاهش تعداد پارامترهای مورد مطالعه و نیز امکان بهره‌وری از مزایای برگردان در هر دو حوزه زمان و فرکانس، پارامترهای مربوط به چشمه‌های نقطه‌ای و گسترده در سه مرحله متوالی و وابسته به هم در حوزه‌های فرکانس و زمان تعیین می‌شود. پارامترهای زمانی و مکانی وقوع زمین‌لرزه و همچنین شکل موج‌های جابه‌جایی پیش پردازش شده به‌عنوان یک پیش نیاز به مجموعه ابزار داده شده و سایر پارامترهای مورد نیاز برگردان در هریک از مراحل سه‌گانه نیز متناسب با

متناظر می‌باشد. طبق جدول ارائه شده توسط دومینگوس و همکاران (۲۰۱۲)، طبقه‌بندی خطای مابین داده‌های مشاهده‌ای و محاسباتی و کیفیت برگردان با توجه به تعداد ایستگاه‌های استفاده شده و خطای حاصل از مراحل اول و دوم به ۴ زیر گروه تقسیم می‌شود. این دسته‌بندی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به وابستگی معیار misfit به تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده و پوشش آزیموتی آنها، معیار دوم سنجش میزان پایداری پاسخ‌های به‌دست آمده تحت عنوان خطای نسبی (relative misfit) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲).

$$RM = \frac{(M-BM)}{BM}, \quad (5)$$

که در آن M بیانگر خطای فرآیند برگردان پس از اعمال تغییر در یک پارامتر بهینه و BM نشانگر خطای حاصل از بهترین برازش می‌باشد. پس از تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مورد مطالعه در مراحل اول و سوم، با انجام فرآیند برگردان ضمن اعمال تغییرات (خطا) حول مقادیر بهینه به‌دست آمده و محاسبه خطای misfit، منحنی‌های خطای نسبی برای پارامترهای امتداد، شیب، زاویه بردار لغزش، عمق مرکزوار، شعاع شکست و سرعت نسبی شکست با استفاده از رابطه ۵ قابل محاسبه خواهد بود. در این منحنی‌ها، هرچه خطای نسبی ناشی از اعمال تغییرات حول مقادیر بهینه بیشتر باشد، پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده از درصد اطمینان بالاتری برخوردار خواهند بود.

جدول ۱. طبقه‌بندی کیفیت برگردان با توجه به خطای حاصل از برگردان (misfit) در مراحل اول و دوم و تعداد ایستگاه‌ها (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲).

تعداد ایستگاه	مرحله ۲	مرحله ۱	کیفیت
≥ ۷	< ۰/۹۰	< ۰/۴۵	A
≥ ۶	< ۱/۰۵	< ۰/۵۰	B
≥ ۵	< ۱/۲۰	< ۰/۶۰	C
≥ ۴	< ۱/۵۰	< ۰/۷۰	D

$$WL(s) = (0.36 * ED(km)) + 60, \quad (2)$$

که WL و ED به ترتیب بیانگر طول پنجره زمانی (ثانیه) و فاصله رومرکزی (کیلومتر) می‌باشد.

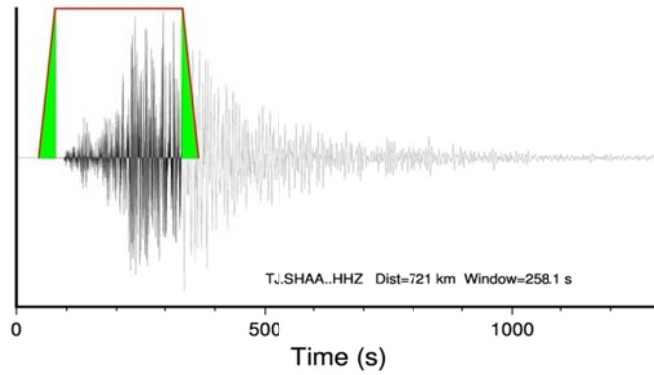
علاوه بر این، یک تابع پنجره‌ای کسینوسی (taper) وابسته به مکان نیز جهت کوتاه کردن هرچه ممکن طول پنجره زمانی و جلوگیری از ورود نوفه به مراحل برگردان بر روی داده‌ها اعمال شده است (سسکا و همکاران، ۲۰۱۰). بدین ترتیب که ابتدا با توجه به رابطه ۲، طول پنجره زمانی در هر یک از ایستگاه‌ها تعیین شده و سپس تابع پنجره‌ای کسینوسی به طول مشخصی از ابتدا و انتهای پنجره زمانی تعیین شده اعمال می‌شود. شماتیکی از نحوه اعمال این تابع بر روی یکی از ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به برازش طیف دامنه و عدم ورود اطلاعات مربوط به فاز، بخش‌های کششی و فشارشی در سازوکار کانونی در این مرحله دارای ابهام بوده و تنها پارامترهای امتداد، شیب، زاویه بردار لغزش (۴ حالت ممکن)، ممان لرزه‌ای عددی و عمق مرکزوار خروجی‌های این مرحله از برگردان به حساب می‌آید. در شکل ۴ نتایج مربوط به زمین‌لرزه مورد مطالعه در این تحقیق حاصل از مرحله اول برگردان آورده شده است.

در مجموعه ابزار KIWI از دو معیار سنجش جهت تعیین میزان پایداری و صحت برگردان پارامترهای به‌دست آمده استفاده می‌شود. معیار اول misfit است که به‌عنوان خطای مابین شکل‌موج‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در مراحل اول و دوم برگردان با استفاده از قاعده L2 (least square) error و در مرحله سوم برگردان با استفاده از قاعده L1 (least absolute deviation) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (دومینگوس، ۲۰۱۰؛ هیمن، ۲۰۱۱):

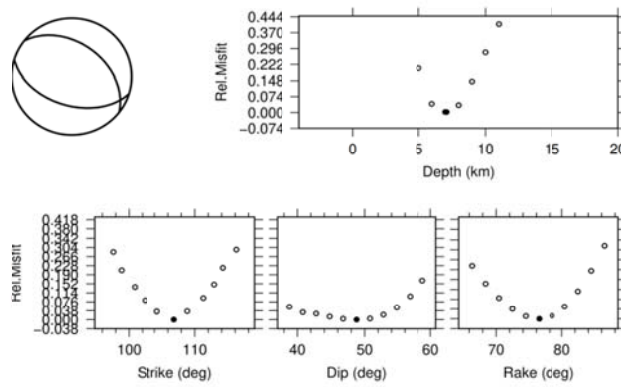
$$\text{Misfit (L2 - norm)} = \frac{\sum (d_j^{\text{syn}} - d_j^{\text{obs}})^2}{\sum (d_j^{\text{obs}})^2} \quad (3)$$

$$\text{Misfit (L1 - norm)} = \frac{\sum |d_j^{\text{syn}} - d_j^{\text{obs}}|}{\sum |d_j^{\text{obs}}|}, \quad (4)$$

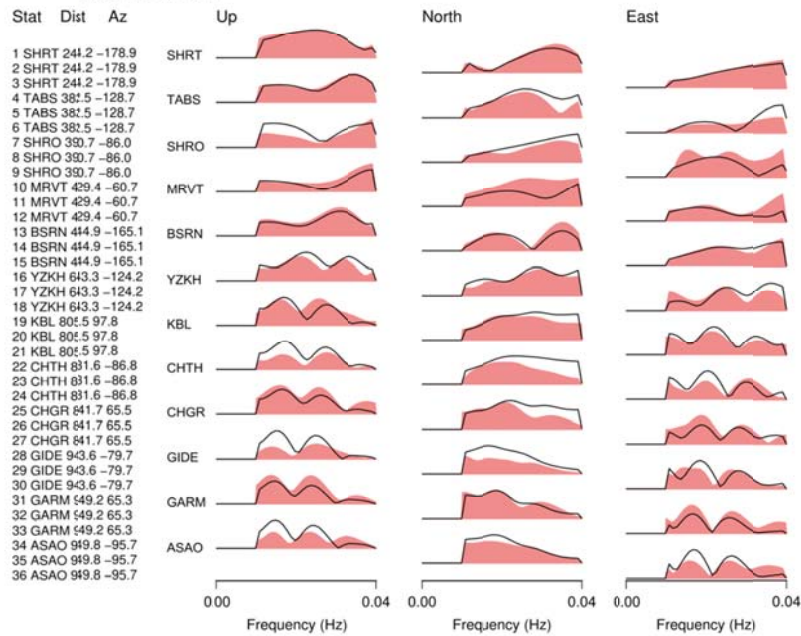
که  $d_j^{\text{obs}}$  بیانگر  $j$  امین نمونه (sample) از یک داده مشاهده‌ای و  $d_j^{\text{syn}}$  نیز بیانگر  $j$  امین نمونه از داده محاسباتی



شکل ۳. شماتیکی از نحوه اعمال تابع پنجره‌ای کسینوسی بر روی ایستگاه SHAA. در شکل بالا پنجره زمانی مورد استفاده در فرآیند برگردان با رنگ قرمز و محدوده اعمال تابع پنجره‌ای کسینوسی با رنگ سبز نمایش داده شده است.



Fit of Amplitude Spectra



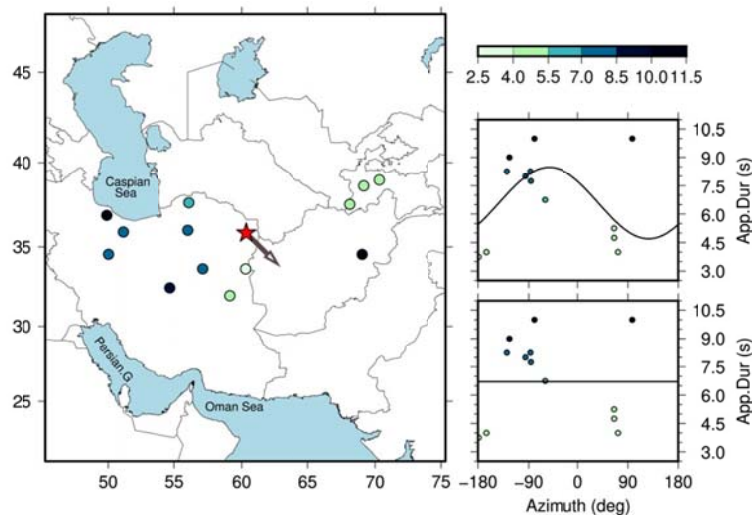
شکل ۴. نتایج حاصل از مرحله اول برگردان مرتبط با زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰). در بخش بالای تصویر، سازوکار کانونی به دست آمده به همراه منحنی‌های خطای نسبی مربوط به عمق، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش نمایش داده شده است. در بخش پایین نیز برازش طیف دامنه داده‌های مشاهده‌ای (قرمز) و محاسباتی (سیاه) ایستگاه‌های مورد استفاده در این مرحله آورده شده است. در سمت چپ این بخش، نام و مقادیر مربوط به فاصله و آزیموت هر یک از ایستگاه‌ها گنجانده شده است.

شکست ظاهری، جهت‌یافتگی چشمه به سه دسته کلی (۱) یک طرفه (unilateral)، (۲) دو طرفه مطلق (bilateral) و (۳) دو طرفه نامتقارن (asymmetric bilateral) تقسیم می‌شود. با توجه به شکل ۵، جهت‌یافتگی چشمه زمین‌لرزه مورد مطالعه در این تحقیق به صورت یک طرفه و در راستای تقریبی آزمون ۱۳۵ درجه بوده است. شایان ذکر است که با توجه به بررسی آزمون جهت‌یافتگی چشمه، پوشش آزمون ایستگاه‌های به کار برده شده نقش به‌سزایی در دقت پاسخ نهایی خواهد داشت. جهت مطالعه بیشتر به مقاله سسکا و همکاران (۲۰۱۱) مراجعه شود.

#### ۲-۳-۴. مرحله دوم، برگردان پارامترهای چشمه نقطه‌ای در حوزه زمان

هدف از این مرحله از برگردان، تعیین مشخصات زمانی و مکانی مرکزوار و رفع ابهام مربوط به بخش‌های فشارشی و کششی سازوکار کانونی باقی‌مانده از مرحله اول است. با توجه به این موضوع، برگردان در حوزه زمان شامل اطلاعات مربوط به پلاریته فاز ترجیح داده می‌شود (سسکا و همکاران، ۲۰۱۰).

استفاده از بخش‌های فرکانس بالای لرزه‌نگاشت‌ها و طیف دامنه آنها امکان مطالعه پارامترهای مرتبط با فرآیند شکست نظیر گستره، سرعت و جهت‌یافتگی شکست را برای ما فراهم می‌سازد. وابستگی آزمون‌یافته دامنه و پریود زمانی فازهای مختلف اولین نشانه از راستای جهت‌یافتگی چشمه زمین‌لرزه است (سسکا و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به این موضوع، پس از تعیین پارامترهای بهینه الگوی تشعشع، با توجه به سازوکار کانونی به دست آمده، با فرض یک چشمه نقطه‌ای و در نظر گرفتن هر یک ایستگاه‌ها به صورت معجزا، با استفاده از بخش‌های فرکانس بالای طیف دامنه موج P لرزه‌نگاشت‌ها (تا ۰/۵ هرتز و حتی بالاتر برای زمین‌لرزه‌های کوچک با مدت‌زمان شکست کمتر از ۲ ثانیه) و برگردان تابع زمانی چشمه (source time function)؛ مدت‌زمان شکست ظاهری (apparent rupture duration) در ایستگاه مورد نظر محاسبه شده و نهایتاً منحنی مدت‌زمان شکست ظاهری چشمه بر حسب آزمون رسم می‌شود. کمینه مقدار این منحنی بیانگر راستای آزمون جهت‌یافتگی چشمه زمین‌لرزه است. در مجموعه ابزار KIWI، با توجه به منحنی مدت‌زمان

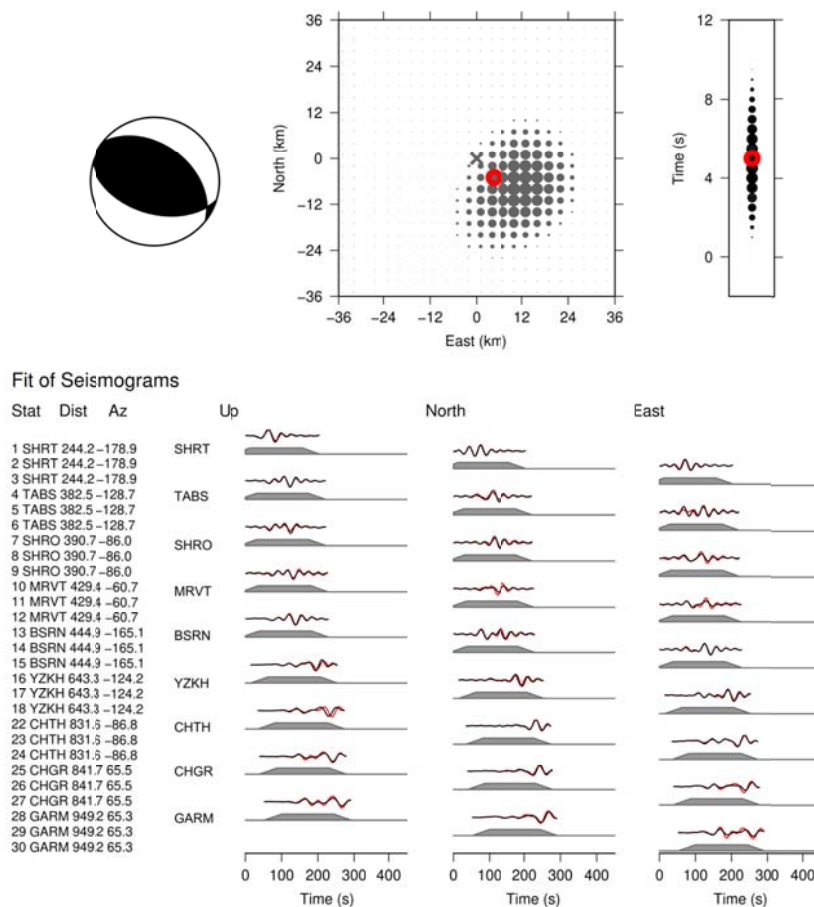


**شکل ۵.** تعیین سریع جهت‌یافتگی چشمه زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰). در سمت چپ تصویر، ستاره قرمز مکان رومرکز و دایره‌ها بیانگر مکان ایستگاه‌های به کار برده شده می‌باشد. رنگ هریک از دایره‌ها با توجه به نوار رنگی موجود، مدت‌زمان ظاهری چشمه در هر ایستگاه را نشان می‌دهد. پیکان رسم شده نیز بیانگر راستای جهت‌یافتگی چشمه (آزمون ۱۳۵ درجه) است. در سمت راست و بالای تصویر، بهترین منحنی برازش شده بر نقاط در نمودار آزمون-مدت‌زمان ظاهری چشمه به نمایش درآمده است که کمینه مقدار آن نشان دهنده جهت‌یافتگی چشمه می‌باشد. در زیر این نمودار نیز، خط مشکی رسم شده بیانگر متوسط مقدار مدت‌زمان ظاهری چشمه در ایستگاه‌ها است که یک دید کلی از مدت‌زمان شکست به دست می‌دهد.



در این مرحله، ابتدا با در نظر گرفتن هر دو احتمال ممکن برای پلاریته سازوکار کانونی به دست آمده در مرحله اول برگردان، داده‌های مصنوعی جهت برازش با داده‌های مشاهده‌ای ایجاد شده و با محاسبه خطای حاصل از هر دو حالت ممکن (با اعمال یک شیفت زمانی بر روی داده‌های مشاهده‌ای به منظور جبران خطاهای احتمالی موجود در مدل سرعتی مورد استفاده و تعیین بهترین برازش)، پلاریته سازوکار کانونی به دست آمده، مکان و زمان مرکزوار طی یک جستجوی شبکه‌ای (grid search) حول مقادیر مکانی و زمانی وقوع زمین‌لرزه به دست خواهد آمد می‌آید. این نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

در این مرحله، ابتدا با در نظر گرفتن هر دو احتمال ممکن برای پلاریته سازوکار کانونی به دست آمده در مرحله اول برگردان، داده‌های مصنوعی جهت برازش با داده‌های مشاهده‌ای ایجاد شده و با محاسبه خطای حاصل از هر دو حالت ممکن (با اعمال یک شیفت زمانی بر روی داده‌های مشاهده‌ای به منظور جبران خطاهای احتمالی موجود در مدل سرعتی مورد استفاده و تعیین بهترین برازش)، پلاریته سازوکار کانونی به دست آمده، مکان و زمان مرکزوار طی یک جستجوی شبکه‌ای (grid search) حول مقادیر مکانی و زمانی وقوع زمین‌لرزه به دست خواهد آمد



شکل ۶. نتایج حاصل از مرحله دوم برگردان مرتبط با زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰). در بخش بالای تصویر، سازوکار کانونی به همراه بخش‌های کششی و فشارشی و همچنین تصویر قائم مکان و زمان مرکزوار نسبت به مکان چشمه و زمان وقوع زمین‌لرزه نمایش داده شده است (علامت ضربدر بیانگر مکان چشمه و دایره قرمز مکان مرکزوار را نشان می‌دهد. همچنین اندازه دایره‌های خاکستری متناسب با میزان برازش بزرگتر می‌شود). در بخش پایین تصویر نیز برازش داده‌های مشاهده‌ای (قرمز) و محاسباتی (سیاه) ایستگاه‌های به کار برده شده در این مرحله نمایش داده شده است. نوارهای خاکستری در زیر هر یک از جفت داده‌های برازش شده بیانگر تابع پنجره‌ای کسینوسی اعمال شده در هر یک از ایستگاه‌ها می‌باشد. در سمت چپ این بخش، نام و مقادیر مربوط به فاصله و آزیموت هر یک از ایستگاه‌ها گنجانده شده است.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از مراحل اول و دوم برگردان مرتبط با زمین لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰). Rel Lat/Lon بیانگر مختصات مرکزوار نسبت به چشمه زمین لرزه در نمای از بالا می باشد.

M <sub>0</sub> (Nm)	Rel Lat / Lon (N / E) (Km)	Depth (km)	Str/Dip/Rk (deg)	Str/Dip/Rk (deg)	Centroid Time (s)	Misfit 1/2	DC/ISO/CL VD (%)
۲/۴۴e+۱۸	-۵/۵	۷/۱	۱۰۷/۴۹/۷۶	۳۰۷/۴۳/۱۰۵	۵/۰	۰/۳۴ / ۰/۶۸	۸۷/۰/۱۳

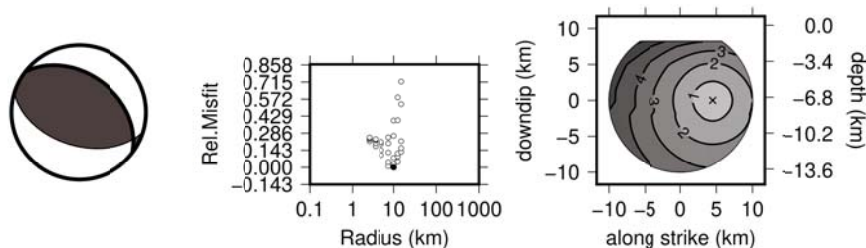
راستای امتداد و شیب صفحه شکست (به منظور تعیین جهت یافتگی چشمه)، سرعت نسبی شکست، مساحت شکست و سایر پارامترهای مربوط به چشمه گسترده نیز قابل محاسبه خواهد بود. در این بخش از تحقیق، یک صافی میان گذر (۰/۱ تا ۰/۱ هرترز) جهت استفاده از فرکانس‌های بالاتر طیف دامنه بر روی داده‌ها اعمال و از کل لرزه‌نگاشت‌ها در انجام فرآیند برگردان استفاده شد. در این مرحله جهت تعیین خطای برگردان؛ قاعده L1 با توجه به استفاده از فرکانس‌های بالاتر طیف دامنه، به قاعده L2 ترجیح داده می‌شود (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). سرعت شکست به طور معمول ثابت و به صورت کسری از سرعت موج برشی تعریف می‌شود. لذا در این تحقیق نیز پس از اعمال برگردان با استفاده از مقادیر مختلف سرعت نسبی شکست در بازه ۰/۵ تا ۰/۹، مقدار بهینه این پارامتر ۰/۷ سرعت موج برشی به دست آمده است. مدت زمان شکست نیز به صورت حاصل جمع ۱- طول تابع زمانی هر یک از چشمه‌های نقطه‌ای تشکیل دهنده چشمه گسترده و ۲- مدت زمان مورد نیاز جهت انتشار شکست در کل صفحه شکست تعریف می‌شود. نتایج مربوط به این مرحله در شکل ۷ و جدول ۳ برآورد شده است. خلاصه‌ای از متغیرهای مجموعه ابزار KIWI جهت اعمال در مراحل سه گانه برگردان در پیوست آورده شد است.

۳-۳-۴. مرحله سوم، برگردان پارامترهای چشمه گسترده در حوزه فرکانس

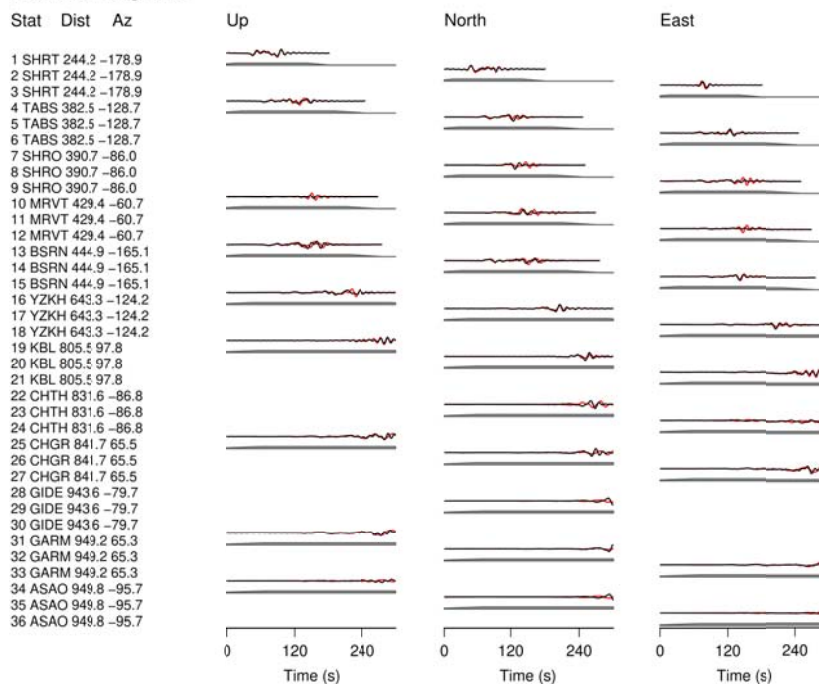
هدف از برگردان پارامترهای چشمه محدود، بررسی مدل‌های چشمه گسترده محتمل و واکاوی اطلاعاتی نظیر راستای گسل اصلی، مساحت شکست و جهت یافتگی چشمه است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۳). پس از به دست آمدن پارامترهای چشمه نقطه‌ای در دو مرحله قبل، در این مرحله از برگردان تمرکز بر روی پارامترهای چشمه گسترده خواهد بود. در این بخش، با توجه به تأثیر تغییرات پارامترهای چشمه گسترده بر روی بخش‌های فرکانس بالای لرزه‌نگاشت‌ها، فرآیند برگردان در حوزه فرکانس و با استفاده از بخش‌های فرکانس بالای طیف دامنه (نسبت به دو مرحله قبل) انجام می‌شود. در این مرحله از برگردان با ثابت فرض کردن پارامترهای چشمه نقطه‌ای به دست آمده در مراحل قبلی و بررسی هر دو صفحه سازوکار کانونی موجود، صفحه گسل اصلی و سایر پارامترهای چشمه گسترده تعریف شده در مدل چشمه ایکنال با اعمال یک جستجوی شبکه‌ای حول مقادیر مختلف پارامترهای مورد نظر و محاسبه خطای هر دسته از پارامترهای ورودی تعیین می‌شود. علاوه بر این، پارامترهایی مثل زمان برخاست، مدت زمان شکست، موقعیت نقطه آغاز شکست نسبت به مرکزوار در دو

جدول ۳. نتایج حاصل از مرحله سوم برگردان مرتبط با زمین لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ با بزرگای محلی ۶/۰. پارامتر Rel Rup Vel بیانگر سرعتی نسبی شکست به صورت کسری از سرعت موج برشی است.

Fault Plain	Directivity Direction	Str/Dip/Rk (deg)	Area (km <sup>2</sup> )	Radius (km)	Average Slip (cm)	Rel Rup Vel (km/s)	Rise Time (s)	Rupture Time (s)	Misfit
Dipping NE	Mostly SE	۳۰۷/۴۳/۱۰۵	۳۰۰/۲	۱۰	۱۶	۰/۷ V <sub>s</sub>	۳/۳	۳/۳ + ۶/۰	۰/۳۶



Fit of Seismograms



شکل ۷. نتایج حاصل از مرحله سوم برگردان مرتبط با زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ (MI ۶/۰). در بخش بالایی تصویر، سازوکار کانونی به همراه صفحه اصلی گسل (با رنگ مشکی مشخص شده است)، محدوده شکست در راستای عمق و شیب صفحه گسل و همچنین منحنی خطای نسبی مربوط به شعاع و سرعت نسبی شکست (ثابت فرض شده است) نمایش داده شده است. بخش پایینی تصویر نیز مربوط به برازش داده‌های مشاهده‌ای (قرمز) و محاسباتی (سیاه) ایستگاه‌های استفاده شده در این مرحله از برگردان می‌باشد. در سمت چپ این بخش، نام و مقادیر مربوط به فاصله و آزیموت هر یک از ایستگاه‌ها گنجانده شده است.

#### ۴-۴. رویکرد Bootstrap

در مجموعه ابزار KIWI، جهت بررسی هرچه بیشتر میزان پایداری و صحت پارامترهای به‌دست آمده در مراحل سه‌گانه برگردان، علاوه بر معیار misfit و خطای نسبی از رویکردی به نام bootstrap استفاده می‌شود. در این رویکرد، با ثابت فرض کردن تمامی پارامترهای مربوط به چشمه نقطه‌ای و تغییر پارامترهای مربوط به ایستگاه‌ها (به‌عنوان مثال، حذف متوالی مؤلفه‌های مختلف در ایستگاه‌ها)، میزان عدم قطعیت پارامترهای به‌دست آمده و

حساسیت فرآیند برگردان نسبت به داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده قابل بررسی است (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰). به این ترتیب که فرآیند برگردان  $n$  مرتبه و هر بار با اعمال تغییرات ایستگاهی متفاوت انجام شده و مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای چشمه نقطه‌ای در خروجی مجموعه ابزار قرار می‌گیرد. با استفاده از این خروجی‌ها، درصد احتمال پاسخ‌های بهینه در یک بازه خاص قابل محاسبه خواهد بود. در مجموعه ابزار KIWI، به‌منظور حفظ سرعت فرآیند برگردان در پیاده‌سازی برخط، فرآیند

bootstrap در مرحله اول برگردان تنها حول بهترین پاسخ به دست آمده برای هر یک از پارامترهای چشمه انجام شده و از اعمال هم‌زمان آن برای تمامی پارامترها صرف‌نظر شده است (فرآیند bootstrap ساده سازی شده) (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲)؛ حال آن‌که در مرحله دوم این فرآیند به‌طور هم‌زمان با استفاده از جستجوی شبکه‌ای حول تمامی پارامترهای موجود انجام می‌شود. نتایج مربوط به رویکرد bootstrap در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به درصد احتمال پارامترهای بهینه به دست آمده صحت پارامترهای به دست آمده قابل تأیید است (با توجه به دومینگوس و همکاران (۲۰۱۲)، درصد احتمال بیش از ۳۰ بیانگر صحت پارامترهای به دست آمده می‌باشد). در میان پارامترهای بررسی شده، پارامتر شیب صفحه گسل از کمترین درصد احتمال برخوردار است؛ امری که با توجه به منحنی خطای نسبی به دست آمده در مرحله اول برگردان دور از انتظار نبوده است.

#### ۴-۵. آزمون حساسیت

همان‌طور که می‌دانیم، مسأله برگردان غیرخطی دارای جواب یکتایی نیست و بی‌شمار پاسخ نهایی را می‌توان برای مجموعه‌ای از داده‌ها به دست آورد (منکه، ۱۹۸۹؛ آستر، ۲۰۰۵؛ بازرگان، ۱۳۹۵). هدف از آزمون حساسیت، تعیین متغیرهای مهم برگردان و تأثیر آن بر پاسخ نهایی و به عبارتی، تعیین میزان پایداری پاسخ نهایی به دست آمده است (هارتزل و همکاران، ۲۰۰۷). در این بخش از تحقیق با انجام مکرر فرآیند برگردان، به بررسی نقش پوشش آزمون‌های ایستگاه‌ها و دقت مدل سرعتی مورد استفاده در پاسخ نهایی مربوط به سازوکار کانونی پرداخته و سپس همین فرآیند به‌منظور تعیین حساسیت برگردان نسبت به موقعیت مکانی چشمه زمین‌لرزه (پارامترهایی چون طول و عرض جغرافیایی و عمق) تکرار شده است.

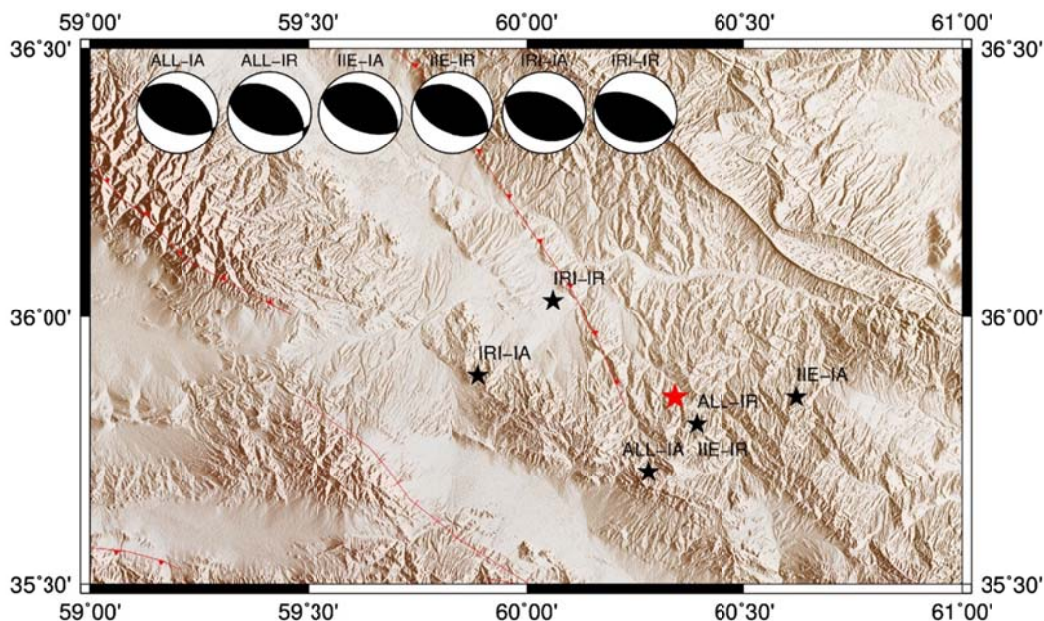
۴-۵-۱. پوشش آزمون‌های ایستگاه‌ها و مدل سرعتی همان‌طور که گفته شد، روش توسعه یافته توسط سیکا و همکاران (۲۰۰۶) در مجموعه ابزار KIWI پیاده سازی شده است. با توجه به ادعای توسعه دهندگان این روش مبنی بر پایداری برگردان تحت شرایطی چون پوشش آزمون‌های ضعیف ایستگاه‌ها و نیز عدم وجود مدل پوسته مناسب جهت ساخت تابع گرین؛ در این بخش از مطالعه به بررسی عملکرد این مجموعه ابزار تحت شرایط بالا پرداخته شده است. بدین‌منظور، داده‌های مذکور در بخش (۲-۱) به سه زیر گروه ۱- داده‌های برگرفته از شبکه باندپهن IIEES، ۲- داده‌های شبکه جهانی IRIS و ۳- تمامی داده‌های موجود تقسیم شده و با استفاده از دو مدل پوسته ۱- IASP91 و ۲- IRSC فرآیند برگردان تحت شش زیر مجموعه اطلاعاتی مختلف انجام شد. نتایج حاصل از این شش برگردان در جدول ۵ نمایش داده شده است. در شکل ۸، نتایج حاصل از زیرگروه‌های اطلاعاتی مختلف با استفاده از دو کد اختصاری به ترتیب از چپ به راست بیانگر شکل موج و مدل پوسته مورد استفاده از یکدیگر متمایز شده‌اند. به‌عنوان مثال کد ALL-IR، که در اینجا مجموعه اطلاعاتی بهینه در نظر گرفته شده است، بیانگر استفاده از تمامی داده‌ها و مدل پوسته IRSC است. سازوکار کانونی به دست آمده با استفاده از همگی زیرگروه‌ها جنبشی عمدتاً شیب‌لغز معکوس به‌همراه مؤلفه راستالغز را نشان می‌دهد. بیشینه تغییر عمق مرکروار، عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی نسبت به پاسخ بهینه ۱/۹ کیلومتر، ۰/۲۳ و ۰/۵ درجه مرتبط با زیرگروه‌های اطلاعاتی IRI-IA و IRI-IR می‌باشد که از آن می‌توان به نقش فاصله ایستگاه‌های مورد استفاده در فرآیند برگردان و تعیین پارامترهای چشمه پی برد. علاوه بر این، کمینه بودن مقدار ممان عددی به‌هنگام استفاده از داده‌های شبکه IIEES (کد IIE-IR و IIE-IA) را می‌توان نشانی بر جهت‌یافتگی ضعیف چشمه به سمت غرب رومرکز زمین‌لرزه قلمداد کرد.

جدول ۴. نتایج حاصل از رویکرد bootstrap و درصد اطمینان پارامترهای چشمه نقطه‌ای به‌دست آمده در این تحقیق. مقادیر داخل پرانتز بیانگر بازه مربوط به تعیین درصد اطمینان هر یک از پارامترها می‌باشد.

$M_0$ ( $\pm 0.1 M_0$ )	Lat/Lon ( $\pm 2.5$ km)	Depth ( $\pm 2$ km)	Strike ( $\pm 20$ deg)	Dip ( $\pm 20$ deg)	Rake ( $\pm 20$ deg)	Time ( $\pm 0.5$ sec)
٪۹۱	٪۷۲	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۶۸	٪۱۰۰	٪۷۶

جدول ۵. نتایج حاصل از برگردان با استفاده از زیرگروه‌های اطلاعاتی شش‌گانه. پارامترهای A-Slip و T-off به‌ترتیب بیانگر زمان مرکروار و میانگین لغزش می‌باشد.

V-Model	Stations	Str (deg)	Dip (deg)	Rk (deg)	M0 (Nm)	Dep (km)	C.T (s)	A-slip (m)	Area (km <sup>2</sup> )
Iasp91	IIEES	۳۰۷	۳۴	۱۰۶	۱/۴۰e۱۸	۷/۹	۳/۳	۰/۰۸	۳۱۴/۰
	IRIS	۲۹۰	۵۴	۹۰	۳/۷۴e۱۸	۵/۲	۳/۳	۱/۳۲	۷۷/۳
	All	۳۰۶	۳۸	۱۰۴	۲/۹۲e۱۸	۶/۲	۳/۳	۰/۲۱	۲۹۳/۱
IRSC	IIEES	۳۰۹	۳۸	۱۱۰	۱/۱۷e۱۸	۷/۸	۳/۳	۰/۱۲	۱۷۶/۶
	IRIS	۲۹۳	۵۸	۹۴	۳/۴۱e۱۸	۵/۹	۳/۳	۱/۰۵	۷۸/۵
	All	۳۰۷	۴۳	۱۰۵	۲/۴۴e۱۸	۷/۱	۳/۳	۰/۱۶	۳۰۰/۲

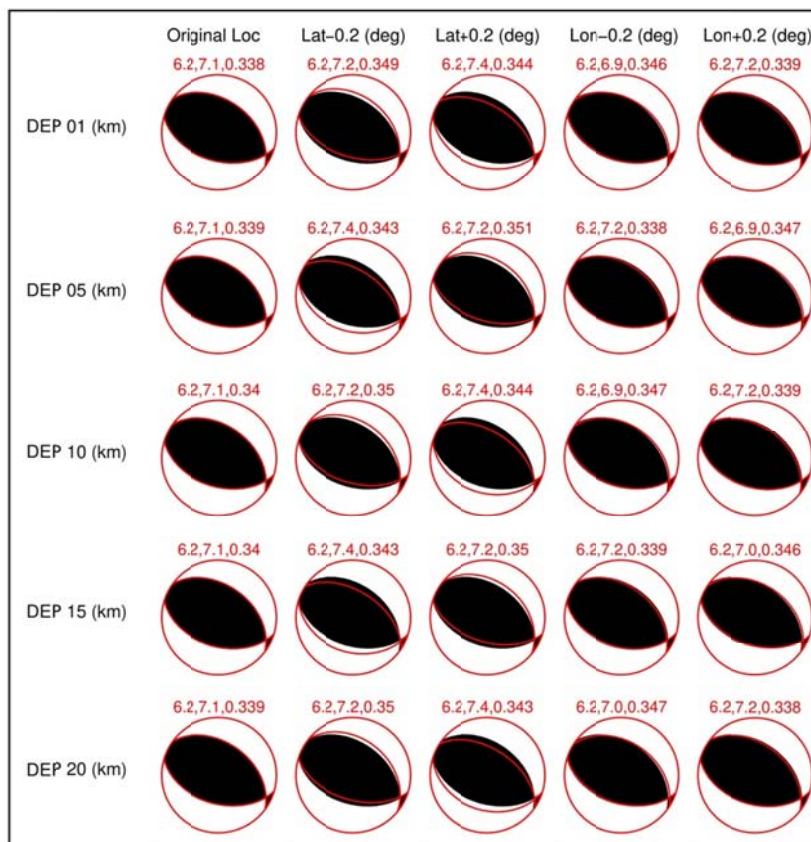


شکل ۸. نتایج حاصل از برگردان با استفاده از زیرگروه‌های اطلاعاتی مختلف. ستاره قرمز رنگ رومرکز تعیین شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری را نشان می‌دهد. ستاره‌های مشکی بیانگر مکان مرکروار تعیین شده با استفاده از زیرگروه‌های اطلاعاتی شش‌گانه است. این زیرگروه‌های اطلاعاتی با استفاده از حروف اختصاری مربوط به شکل موج و مدل پوسته مورد استفاده (به‌ترتیب از چپ به راست) از یکدیگر متمایز می‌شوند. کدهای IRI, IIE و ALL به‌ترتیب بیانگر شکل‌موج‌های شبکه IRIS, IIEES و کل داده‌های موجود و کدهای IA و IR نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده مدل پوسته IASP91 و IRSC می‌باشند (زیرگروه اطلاعاتی با کد ALL-IR به‌عنوان زیرگروه بهینه در نظر گرفته شده است). سازوکار کانونی محاسبه شده مرتبط با هر یک از زیرگروه‌های اطلاعاتی نیز در بخش بالایی نقشه نمایش داده شده است.

## ۴-۵-۲. موقعیت مکانی چشمه

در این قسمت با استفاده از زیرگروه اطلاعاتی بهینه و ایجاد تغییر در پارامترهای ورودی مجموعه ابزار KIWI، سعی بر آن شد تا میزان حساسیت فرآیند برگردان نسبت به پارامترهای مرتبط با مکان چشمه مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در ابتدا با ثابت فرض کردن مقادیر طول و عرض جغرافیایی (حاصل از فرآیند تعیین محل مجدد)، به بررسی پایداری برگردان نسبت به تغییرات عمق پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصل شده، فرآیند برگردان نسبت به تغییرات عمق از پایداری بالایی برخوردار بوده است؛ به گونه‌ای که با تغییر پارامتر ورودی عمق از ۱ تا ۲۰ کیلومتر تغییری در پارامترهای چشمه نقطه‌ای بهینه به دست آمده در این تحقیق مشاهده نشده است. لذا تلاش شد تا با تغییر هم‌زمان موقعیت رومرکزی

و عمق زمین‌لرزه به بررسی دقیق‌تر پایداری برگردان پرداخته شود (اعمال خطا در پارامترهای طول و عرض جغرافیایی رومرکز زمین‌لرزه به میزان  $\pm 0.2$  درجه). در مسأله برگردان پارامترهای چشمه، هرچه ایستگاه‌های مورد استفاده در فاصله کمتری نسبت به رومرکز زمین‌لرزه قرار داشته باشند، تأثیر خطای پارامترهای ورودی مرتبط با رومرکز زمین‌لرزه بیشتر خواهد بود (دومینگوس و همکاران، ۲۰۱۲). لذا با توجه به استفاده از داده‌های ناحیه‌ای، تأثیر خطای این پارامترها در نتیجه برگردان ناچیز بوده است. در شکل ۹ نتایج مرتبط با این بخش از آزمون حساسیت نمایش داده شده است. در این شکل، مقادیر بزرگ، عمق مرکزوار و خطای برگردان به ترتیب از چپ به راست بالای سازوکار کانونی مرتبط با هر آزمون آورده شده است.



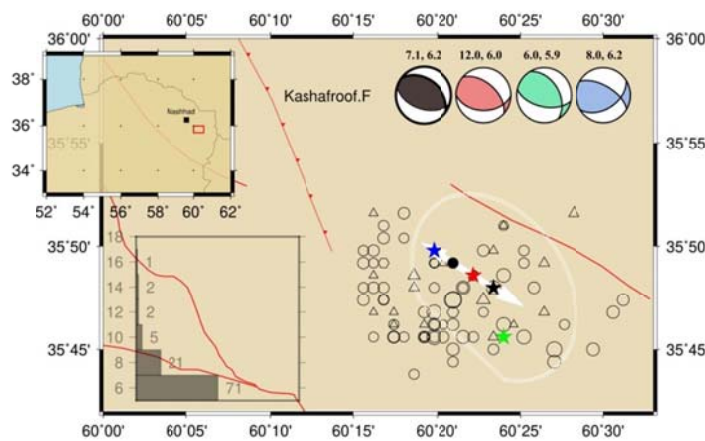
شکل ۹. نتایج حاصل از آزمون حساسیت مرتبط با تغییرات موقعیت مکانی چشمه زمین‌لرزه. سازوکار کانونی مشکلی بیانگر نتیجه بهینه به دست آمده در این تحقیق و سازوکارهای قرمز حاصل از هر آزمون می‌باشد. بزرگ، عمق مرکزوار و خطای حاصل از مرحله اول برگردان در بالای هر سازوکار کانونی به ترتیب از چپ به راست آورده شده است.



## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

مجموعه ابزار KIWI با ویژگی‌ها و قابلیت‌هایی نظیر  
 ۱- پایداری بالای برگردان به‌هنگام عدم وجود  
 شکل‌موج‌های کافی، پوشش آزیموتی ضعیف ایستگاه‌ها  
 و مدل پوسته ساده، ۲- عدم وجود محدودیت در عمق و  
 بزرگای زمین‌لرزه مورد مطالعه، ۳- امکان پیاده‌سازی  
 برخط (دو کشور آلمان و پرتغال در حال پیاده‌سازی برخط  
 این مجموعه ابزار می‌باشند (سیسکا و همکاران، ۲۰۱۰)،  
 ۴- تحلیل انواع داده‌های لرزه‌ای (سری‌های زمانی، طیف  
 دامنه، امواج حجمی، امواج سطحی، کل لرزه‌نگاشت و  
 غیره)، ۵- امکان اعمال گزینه‌هایی نظیر وزن‌دهی به  
 بخش‌های مختلف لرزه‌نگاشت‌ها و تابع پنجره‌ای  
 کسینوسی، ۶- تعیین سریع جهت‌یافتگی چشمه و ۷- عدم  
 نیاز به پیش‌لرزه و پس‌لرزه جهت پیش‌برد فرآیند  
 برگردان، گزینه‌ای بسیار مناسب جهت تعیین سریع  
 مکانیسم چشمه زمین‌لرزه‌ها، به‌ویژه زمین‌لرزه‌های  
 کوچک به حساب می‌آید. از این‌رو، در این تحقیق به  
 بررسی مراحل برگردان در مجموعه ابزار KIWI پرداخته  
 و به‌منظور بررسی عملکرد و پایداری فرآیند برگردان در  
 آن مطالعه چشمه زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ

(MI ۶/۰) در دستور کار قرار گرفته است. امروزه  
 پیچیدگی فرآیند وقوع زمین‌لرزه‌ها شامل بی‌نظمی حاکم  
 بر نحوه توزیع تنش و شکست به‌دلیل مقاومت مواد  
 گوناگون درون زمین امری اثبات شده است (داس و  
 آکی، ۱۹۷۷؛ آکی، ۱۹۷۹؛ مک‌گار، ۱۹۸۱؛ یاماشیتا؛  
 نوپوف، ۱۹۸۷). مطالعات انجام شده بر روی امواج لرزه‌ای  
 نیز حاکی از آن است که میزان لغزش بر روی سطح گسل  
 طی رخداد زمین‌لرزه‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند  
 (هارتزل و هیتون، ۱۹۸۳). با فرض وجود مناطقی با  
 مقاومت بسیار بالا و لغزش ناچیز طی وقوع زمین‌لرزه  
 اصلی، اسپریتی‌ها (asperities)، و همچنین افزایش  
 چشم‌گیر تنش در این نواحی پس از وقوع زمین‌لرزه،  
 می‌توان محل رخداد پس‌لرزه‌های احتمالی را به این مناطق  
 نسبت داد. علاوه بر این، وجود گسل‌ها و شکاف‌های  
 بسیار کوچک در مناطق لرزه‌خیز دور از انتظار نیست.  
 گسل‌هایی که به دلیل افزایش تجمع تنش ناشی از آزاد  
 سازی انرژی طی وقوع یک زمین‌لرزه بزرگ نقش مهمی  
 در رخداد پس‌لرزه‌ها ایفا می‌کنند (یاماشیتا و نوپوف،  
 ۱۹۸۷). در شکل ۱۰، پس‌لرزه‌های رخ داده تا یک روز  
 پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی به‌تصویر کشیده شده است.



شکل ۱۰. پراکندگی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۵ آوریل ۲۰۱۷ سفیدسنگ. دایره‌ها پس‌لرزه‌های رخ داده تا یک روز بعد از وقوع زمین‌لرزه اصلی را نشان می‌دهد (رخدادهای با عمق ۶/۹-۵/۰ و ۸/۹-۷/۰ به‌ترتیب با شکل دایره و مثلث) که بزرگای آنها متناسب با اندازه شکل‌ها است. ستاره‌های قرمز، سبز، آبی و مشکی به‌ترتیب مکان مرکزوار تعیین شده توسط IRSC.GCMT، افلاکی و همکاران (۲۰۱۸) و مکان مرکزوار به‌دست آمده در این تحقیق را نشان می‌دهد. سازوکار کانونی تعیین شده توسط هر سازمان نیز به‌همراه مقادیر عمق و بزرگای تعیین شده (به‌ترتیب از چپ به راست) مشابه با رنگ ستاره‌ها در بالای تصویر نمایش داده شده است. دایره توپر مشکی رنگ مکان آغاز شکست، به‌دست آمده در مرحله سوم برگردان، را نشان می‌دهد. تصویر افقی سطح شکست و راستای جهت‌یافتگی چشمه نیز به‌ترتیب با نقطه‌چین و پیکان سفید مشخص شده است. نمودار فراوانی عمقی پس‌لرزه‌ها و منطبقه مورد مطالعه نیز در سمت چپ تصویر به نمایش درآمده است.

معکوس با مؤلفه راستالغز راست‌گرد را نشان داده است. برگردان چشمه گسترده در مطالعه حاضر نشان می‌دهد که زمین‌لرزه از ۴/۵ کیلومتری مرکزوار آغاز شده (در عمقی مشابه با عمق مرکزوار) و در خلاف جهت امتداد گسل (آزموت ۱۲۷ درجه) مساحتی تقریبی به وسعت ۳۰۰ کیلومتر مربع را در مدت‌زمان ۹/۳ ثانیه دچار شکست کرده است.

#### تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل همکاری و در اختیار قرار دادن شکل‌موج‌های مورد استفاده در این مطالعه تشکر به‌عمل می‌آید.

#### مراجع

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۶۷۷ ص.

بازرگان، س.، ۱۳۹۵، برگردان داده‌های لرزه‌ای برای تعیین توزیع لغزش زمین‌لرزه‌های ۱۸ ژوئن ۲۰۰۷ با بزرگی Mw ۵/۵ و ۲۷ سپتامبر ۲۰۱۰ با بزرگی ۵.۹ Mw با استفاده از روش برگردان لغزش: پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

میرزایی، ن.، ۱۳۸۳، سمینار آموزشی مبانی لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل خطر نسبی زمین‌لرزه، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ۷۳ ص.

در این بین، زمین‌لرزه‌های با عمق ۵/۰-۶/۹ و ۷/۰-۸/۹ به‌ترتیب با شکل‌های دایره و مثلث نمایش داده شده‌اند. با توجه به تمرکز پراکندگی پس‌لرزه‌های رخ داده می‌توان به افزایش تجمع تنش در بخش‌های غرب و جنوب غربی رومرکز پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی پی برد. با توجه به این موضوع می‌توان چنین استنباط کرد که مناطق غربی رومرکز زمین‌لرزه مورد مطالعه خارج از ناحیه شکست قرار داشته و نه‌تنها با افت تنش همراه نبوده بلکه تنش حاکم بر این نواحی پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. نکته‌ای که با نتیجه به‌دست آمده در این مطالعه حاکی از تمایل گسترش شکست به‌سمت بخش‌های شرق و جنوب شرقی رومرکز زمین‌لرزه هم‌خوانی دارد. از جمله مطالعات صورت گرفته بر روی زمین‌لرزه سفید-سنگ می‌توان به افلاکی و همکاران (۲۰۱۸) و اشتری جعفری (۲۰۱۹) اشاره کرد. نتایج حاصل از مطالعه افلاکی و همکاران با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و INSAR حاکی از گسستگی عمدتاً معکوس با شیب به‌سمت شمال شرق، شکست (۳۲۰ کیلومتر مربع) یک‌طرفه از شمال غرب به‌سمت جنوب شرق، بزرگای گشتاوری ۶/۲ و عمق مرکزوار ۸/۰ کیلومتر است. در مطالعه اشتری جعفری (۲۰۱۹) تانسور ممان دورلرز برای زمین‌لرزه مورد نظر با ۵ روش مختلف بررسی شد. طی این مطالعه عمق و بزرگای گشتاوری به‌ترتیب بین ۶ تا ۷ کیلومتر و ۵/۹۳ تا ۵/۹۶ در روش‌های مختلف متغیر بوده و سازوکارهای کانونی به‌دست آمده گسستگی عمدتاً

Aflaki, M., Ghods, A., Mousavi, Z., Shabaniyan, E., Vajedian, S. and Akbarzadeh, M., 2018, Seismotectonic characteristics of the 2017 Sefid Sang (Mw 6) earthquake, 18th Iranian Geophysical Conference, 68-71.

Aki, K., 1979, Characterization of barriers on earthquake fault, *J. geophys. Res.*, 84, 6140-6148.

Aki, K. and Richards, P. G., 1980, *Quantitative Seismology*, W. H. Freeman, San Francisco, ISBN 0716710587.

Ashtari Jafari, M., 2019, Teleseismic moment tensors of the 5 April 2017, Mw6. 1, Fariman,

northeast Iran, earthquake. *Acta Geophysica*, 67(2), pp.437-448.

Aster, R. C., Borchers, B. and Thurber, C., 2005, *Parameter estimation and inverse problems*, Academic Press.

Berberian, M., 1981, Active faulting and tectonics of Iran, Department of Earth Sciences, Bullard Laboratories, University of Cambridge, Madingley Rise, Madingley Rd., Cambridge CB3 0EZ, U.K.

Cesca, S., Buforn, E. and Dahm, T., 2006, Moment tensor inversion of shallow earthquakes in Spain, *Geophysics, J. Int.*, 166,



- 839–854, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03073.x.
- Cesca, S. and Heimann, S., 2013, A practical on moment tensor inversion using the Kiwi tools, doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_EX\_3.6.
- Cesca, S. and Heimann, S., 2014, Rapidinv.py, release 14.0. A short user guide. GFZ Potsdam, S2.1.
- Cesca, S., Heimann, S. and Dahm, T., 2011, Rapid directivity detection by azimuthal amplitude spectra inversion, *Seismol. J.* 15(1), 147-164, doi: 10.1007/s10950-010-9217-4.
- Cesca, S., Heimann, S., Stammler, K. and Dahm, T., 2010, automated procedure for point and kinematic source inversion at regional distances, *Geophysics. Res.*, 115(B14), B06304, doi: 10.1029/2009JB006450.
- Dahm, T., Manthei, G. and Eisenblätter, J., 1999, Automated moment tensor inversion to estimate source mechanisms of hydraulically induced micro-seismicity in salt rock, *Tectonophysics*, 306, 1–7, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00041-4.
- Das, S. and Aki, K., 1977, Fault plain with barriers: a versatile earthquake model, *J. geophys. Res.*, 82, 5658-5670.
- Domingues, A., 2010, Kinematic Waveform Inversion-Study of Regional Earthquakes in Southwest Iberia, M.Sc thesis, university of Lisbon, senior technical institute.
- Domingues, A., Custodio, S. and Cesca, S., 2012, Waveform inversion of small-to-moderate earthquakes located offshore southwest Iberia, *Geophysics, J. Int.* doi: 10.1093/gji/ggs010.
- Hartzell, S. and Heaton, T. H., 1983, Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1553-1583.
- Hartzell, S., Liu, P., Mendoza, C., Ji, C. and Larson, K. M., 2007, Stability and Uncertainty of Finite Fault Slip Inversions: Application to the 2004 Parkfield California Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97, 1911-1934.
- Heimann, S., 2011, A robust method to estimate kinematic earthquake source parameters, PhD thesis, University of Hamburg, Hamburg, Germany, 161 p.
- Heimann, S., Cesca, S., Krüger, F. and Dahm, T., 2008, Stable estimation of extended fault properties for medium-sized earthquakes using teleseismic waveform data, *Geophysical Research Abstracts*, pp. EGU2008–A–07,568.
- Jackson, J., 1992, Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern turkey and the Caucasus, *J. Geophys. Res Solid Earth*, pp. 12471-12479.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984, Active tectonics of the alpine-himalayan belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J. Int.*, 77, 185-264.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1988, the relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East, *Geophys. J. Int.*, pp. 45-73.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P. and Berge, C., 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.
- McGarr, A., 1981, Analysis of pick ground motion in terms of a model of inhomogeneous faulting, *J. geophys. Res.*, 86, 3901-3912.
- Menke, W., 1989, *Geophysical data analysis, discrete inverse theory*, Academic press.
- Romanowicz, B. A., 1982, Moment tensor inversion of long period Rayleigh waves, A new approach: *Geophysics, J. Res.*, 87, 5395–5407.
- Yamashita, T. and Knopoff, L., 1987, Models of aftershock occurrence, *geophys. J. R. astr. Soc.* 91, 13-26.
- Su, Z., Yang, Y., Li, Y., Xu, X., Zhang, J., Zhou, X., Ren, J., Wang, E., Hu, J.C., Zhang, S. and Talebian, M., 2019, Coseismic displacement of the 5 April 2017 Mashhad earthquake (Mw 6.1) in NE Iran through Sentinel-1A TOPS data: New implications for the strain partitioning in the southern Binalud Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences*, 169,244-256.

## پیوست

مهم‌ترین متغیرهای مجموعه ابزار KIWI جهت شرکت در مراحل سه‌گانه برگردان در قالب پیوست الکترونیکی زیر ارائه شده است.

- ۱- CHANNEL (BH | HH | ... | ALL): تعیین کانال مورد نظر جهت استفاده در فرآیند برگردان.  
 ۲- COMP\_2\_USE: تعیین مؤلفه‌های مورد نظر جهت استفاده در فرآیند برگردان.  
 n: North s: South e: East w: West  
 r: Transversal, rightward l: Transversal, leftward a: radial, away from source  
 d: Down u: Up  
 c: radial, backward to source
- ۳- CONFIDENCE\_INT (68 | 95 | 99): بازه اطمینان مورد نظر جهت استفاده در فرآیند bootstrap.  
 ۴- DATA\_DIR: مسیر داده‌های ذخیره شده جهت استفاده در فرآیند برگردان.  
 ۵- DATA\_FORMAT: فرمت داده‌های مورد استفاده در فرآیند برگردان.  
 ۶- DAY: روز وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۷- EPIC\_DIST\_MAX: تعیین بیشینه فاصله ایستگاه‌ها جهت استفاده در مرحله اول برگردان.  
 ۸- EPIC\_DIST\_MIN: تعیین کمینه فاصله ایستگاه‌ها جهت استفاده در مرحله اول برگردان.  
 ۹- GF\_INTERPOLATION: روش مورد نظر جهت درون‌یابی توابع گرین مورد استفاده در فرآیند برگردان.  
 ۱۰- HOUR: ساعت وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۱۱- INVERSION\_DIR: مسیر مورد نظر جهت ذخیره خروجی‌های فرآیند برگردان.  
 ۱۲- LATITUDE\_NORTH: عرض جغرافیایی رومرکز زمین‌لرزه مورد مطالعه (درجه).  
 ۱۳- LEVEL\_RELAMP: یکی از دو روش موجود در مجموعه ابزار KIWI جهت حذف داده‌ها نامناسب تعیین یک حد آستانه برای نسبت بیشینه دامنه یک لرزه‌نگاشت و میانگین بیشینه دامنه تمامی نگاشت‌های مورد استفاده در فرآیند برگردان است. به‌عنوان مثال برای مقدار ۵۰، نگاشت‌هایی با بیشینه دامنه ۵۰ بار بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از میانگین دامنه نگاشت‌ها از فرآیند برگردان حذف خواهند شد.  
 ۱۴- LEVEL\_S2N: تعیین نسبت سیگنال به نوفه جهت حذف داده‌ها نامناسب از فرآیند برگردان.  
 ۱۵- LONGITUDE\_EAST: طول جغرافیایی رومرکز زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۱۶- MAX\_STAT\_2\_PLOT: بیشینه تعداد نگاشت‌ها جهت نمایش در خروجی نهایی مجموعه ابزار.  
 ۱۷- MAX\_DEP\_GFDB: بیشینه عمق تابع گرین مورد استفاده در فرآیند برگردان بر حسب متر (جهت محدود کردن هندسه چشمه گسترده).  
 ۱۸- MIN\_DEP\_GFDB: کمینه عمق تابع گرین مورد استفاده در فرآیند برگردان بر حسب متر (جهت محدود کردن هندسه چشمه گسترده).  
 ۱۹- MIN: دقیقه وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۲۰- MONTH: ماه وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۲۱- NOISE\_WINDOW (4mintot0 | before | after): تعیین پنجره زمانی مورد نظر جهت تعیین سطح نوفه.  
 ۲۲- NUM\_BOOTSTRAP: تعداد تنظیمات ایستگاهی مورد نظر در فرآیند bootstrap.  
 ۲۳- NUM\_INV\_STEPS (1 | 2 | 3): تعداد مراحل برگردان. ۱- تعیین سازوکار کانونی، ۲- تعیین سازوکار کانونی، مکان و زمان مرکزوار ۳- برگردان کامل چشمه نقطه‌ای و گسترده.  
 ۲۴- ORIG\_TIME: تعریف یک شیفت زمانی جهت تصحیحات زمانی داده‌ها (بر حسب ثانیه).  
 ۲۵- ORIG\_NORTH\_SHIFT: تعریف یک شیفت مکانی در راستای عرض جغرافیایی جهت تصحیح عرض جغرافیایی ورودی به مجموعه ابزار (بر حسب متر).  
 ۲۶- ORIG\_EAST\_SHIFT: تعریف یک شیفت مکانی در راستای طول جغرافیایی جهت تصحیح طول جغرافیایی ورودی به مجموعه ابزار (بر حسب متر).  
 ۲۷- RISE\_TIME: تعیین زمان برخاست مورد نظر جهت استفاده در مرحله اول و دوم برگردان.  
 ۲۸- SCALING\_FACTOR: ضریب مورد نظر جهت اعمال بر روی توابع گرین مورد استفاده به منظور تصحیح دامنه آنها.  
 ۲۹- SEC: ثانیه وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۳۰- SW\_APPLY\_TAPER (True | False): اعمال تابع پنجره‌ای کسینوسی بر روی داده‌های موجود در حوزه زمان.  
 ۳۱- SW\_FILTER\_NOISY (True | False): اعمال فرآیند حذف داده‌های نوفه‌ای (نامناسب) با استفاده از دو روش موجود در مجموعه ابزار.  
 ۳۲- SW\_TRACE0TIME (True | False): در صورت True، مقادیر تعریف شده برای زمان وقوع زمین‌لرزه (HOUR, MIN, SEC, DAY, ...) نادیده گرفته شده و زمان صفر (۱۹۷۰/۱/۱) به‌عنوان زمان وقوع زمین‌لرزه در نظر گرفته می‌شود.  
 ۳۳- SW\_WEIGHT\_DIST (True | False): اعمال یک وزن وابسته به مکان بر روی نگاشت‌های مورد استفاده در فرآیند برگردان.  
 $W = \text{Station Epicentral Distance} / \text{Maximum Epicentral Distance}$   
 ۳۴- YEAR: سال وقوع زمین‌لرزه مورد مطالعه.  
 ۳۵- BP\_Fn\_STEPm (n=1,2,3,4 | m=1,2,3): تعیین محدوده فرکانسی فیلتر باند پهن مورد نظر جهت اعمال بر روی نگاشت‌ها در مرحله m ام برگردان.  
 ۳۶- DATA\_PLOT\_STEP1 (seis | amsp): تعیین نوع نمایش داده‌ها در خروجی نهایی. Amsp = طیف دامنه، Seis = داده‌های زمانی.  
 ۳۷- DEPTH\_BOTTOMLIM: کمینه عمق قابل قبول پس از مرحله اول برگردان (بر حسب کیلومتر).  
 ۳۸- DEPTH\_UPPERLIM: بیشینه عمق قابل قبول پس از مرحله اول برگردان (بر حسب کیلومتر).  
 ۳۹- DEPTH\_STEP: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی عمق زمین‌لرزه مورد مطالعه در مرحله اول برگردان.  
 ۴۰- DEPTH\_1: کمینه مقدار عمق مورد مطالعه جهت استفاده در مرحله اول برگردان.

پیوست

- ۴۱- DEPTH\_2: بیشینه مقدار عمق مورد مطالعه جهت استفاده در مرحله اول برگردان.
- ۴۲- DIP\_STEP: گام مورد نظر جهت محاسبه شیب صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۴۳- DIP\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه شیب صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۴۴- DIP\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه شیب صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۴۵- GFDB\_STEPn (n=1,2,3): مسیر توابع گرین مورد استفاده در برگردان مراحل اول تا سوم.
- ۴۶- INV\_MODE\_STEP1: تعیین روش اعمال برگردان در مرحله اول.
- Invert\_dmsdsok: چهار مرحله برگردان شامل برگردان (۱) ممان عددی (۲) ممان عددی، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان (۳) عمق، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان (۴) ممان عددی، عمق، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان.
- Invert\_dmsds: دو مرحله برگردان شامل برگردان (۱) ممان عددی و عمق بطور هم‌زمان و (۲) ممان عددی، عمق، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان.
- Invert\_dmsdst2x: چهار مرحله برگردان شامل برگردان (۱) ممان عددی و عمق بطور هم‌زمان، (۲) ممان عددی، عمق، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان، (۳) امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان و (۴) زمان برخاست.
- Invert\_msds: برگردان ممان عددی، امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان.
- Invert\_dsds: برگردان امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش بطور هم‌زمان.
- Invert\_dm: برگردان ممان عددی و عمق بطور هم‌زمان.
- Invert\_dm: برگردان ممان عددی.
- Grid: روش جست و جوی شبکه‌ای.
- ۴۷- LOOPS\_SDS\_CONF: تعیین تعداد حلقه‌ها در مرحله اول برگردان. پس از اعمال اولین حلقه از برگردان، شروع حلقه بعدی حول نتایج به‌دست آمده از حلقه قبل خواهد بود.
- ۴۸- MISFIT\_MET\_STEP1: تعیین روش مورد نظر جهت محاسبه خطای برگردان.
- ampspec\_l1norm: مقایسه طیف دامنه نگاشت‌های مصنوعی و مشاهده‌ای با استفاده از قاعده L1
- ampspec\_l2norm: مقایسه طیف دامنه نگاشت‌های مصنوعی و مشاهده‌ای با استفاده از قاعده L2
- l1norm: مقایسه نگاشت‌های زمانی مصنوعی و مشاهده‌ای با استفاده از قاعده L1
- l2norm: مقایسه نگاشت‌های زمانی مصنوعی و مشاهده‌ای با استفاده از قاعده L2
- ۴۹- PHASE\_TO\_USE\_ST1: تعریف فاز لرزه‌ای مورد نظر جهت استفاده در مرحله اول برگردان.
- p: فاز P در تمامی مؤلفه‌های مورد استفاده.
- s: فاز S در تمامی مؤلفه‌های مورد استفاده.
- b: امواج حجمی، موج P در مؤلفه قائم و S در سایر مؤلفه‌ها.
- f: امواج سطحی در تمامی مؤلفه‌های مورد استفاده.
- a: استفاده از کل نگاشت‌ها در تمامی مؤلفه‌های مورد استفاده.
- x: استفاده از یک طول ثابت از نگاشت‌ها در تمامی مؤلفه‌های مورد استفاده.
- ۵۰- RAKE\_STEP: گام مورد نظر جهت محاسبه زاویه بردار لغزش صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۱- RAKE\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه زاویه بردار لغزش صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۲- RAKE\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه زاویه بردار لغزش صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۳- REDUCE\_SDS\_CONF: در صورتی که مقدار پارامتر LOOPS\_SDS\_CONF بیش از یک باشد، این پارامتر نحوه تغییر مقادیر امتداد، شیب و زاویه بردار لغزش برای حلقه‌های بعدی را تعیین می‌کند. به‌عنوان مثال اگر مقدار پارامتر LOOPS\_SDS\_CONF برابر ۳، گام اولیه برابر ۳۰ و بهترین مقدار برای امتداد در حلقه اول ۴۲ باشد، مقدار امتداد در مرحله دوم از ۱۲ تا ۷۲ مورد بررسی قرار خواهد گرفت و گام بررسی نیز ۱۰ (۳۰/۳) خواهد بود.
- ۵۴- LOOPS\_DEP\_CONF: مشابه با پارامتر REDUCE\_SDS\_CONF برای عمق زمین‌لرزه مورد مطالعه.
- ۵۵- STRIKE\_STEP: گام مورد نظر جهت محاسبه امتداد صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۶- STRIKE\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه امتداد صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۷- STRIKE\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه امتداد صفحات گسلی در مرحله اول برگردان.
- ۵۸- SW\_FIXTAPER\_ST1 (True | False): در صورت استفاده از کل لرزه‌نگاشت‌ها در فرآیند برگردان، طول پنجره زمانی در هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از رابطه زیر تعیین خواهد شد.
- $$W = (0.36 * \text{epicentral\_distance\_in\_km}) + 60$$
- ۵۹- SW\_RAPIDSTEP1 (True | False): جهت افزایش سرعت فرآیند برگردان در مرحله اول، مقادیر تعریف شده برای زوایای امتداد، شیب و بردار لغزش نادیده گرفته شده و از ۱۰ تنظیمات اولیه پیش فرض برای زوایای مذکور استفاده می‌شود.
- ۶۰- WEIGHT\_n\_ST1 (n=A|P|S|R): اعمال یک وزن بر روی پنجره زمانی فاز n طی مرحله اول برگردان.
- ۶۰- WIN\_LENGTH\_n\_ST1 (n=A|P|S|R|X): طول پنجره زمانی فاز n طی مرحله اول برگردان.
- ۶۱- WIN\_START\_A\_ST1: تعیین زمان شروع پنجره زمانی فاز a در مرحله اول برگردان. مقدار این پارامتر بیانگر زمان رسید تئوری موج P در پنجره زمانی مورد استفاده، تعریف شده به‌صورت درصدی از طول پنجره زمانی، می‌باشد. به‌عنوان مثال، مقدار ۰/۰۲ برای یک پنجره زمانی به طول ۱۰۰ ثانیه بیانگر آن است که پنجره مورد نظر ۲ ثانیه قبل از زمان رسید تئوری موج P آغاز می‌شود.

## پیوست

- ۶۲-WIN\_TAPER\_A\_ST1: تعیین نحوه اعمال تابع پنجره‌ای کسینوسی بر روی پنجره زمانی a طی مرحله اول برگردان. به عنوان مثال، مقدار ۰/۰۱ برای یک پنجره زمانی به طول ۱۰۰ ثانیه موجب اعمال تابع پنجره‌ای کسینوسی بر روی یک ثانیه از ابتدا و انتهای پنجره زمانی می‌شود.
- ۶۳-SCAL\_MOM\_STEP: گام مورد نظر جهت محاسبه ممان عددی در مرحله اول برگردان (Nm).
- ۶۴-SCAL\_MOM\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه ممان عددی در مرحله اول برگردان (Nm).
- ۶۵-SCAL\_MOM\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت محاسبه ممان عددی در مرحله اول برگردان (Nm).
- ۶۶-AMPL\_PLOT\_STEP1: تعیین نحوه نمایش طیف دامنه و یا نگاشت‌های زمانی در خروجی نهایی مرحله اول برگردان.
- amax: دامنه نگاشت‌های مختلف با مقیاسی مشابه نمایش داده می‌شود (دامنه‌های حقیقی بهتر نمایش داده می‌شود).
- norm: دامنه‌های نرمال شده جهت مشاهده هر چه بهتر برازش نمایش داده می‌شود.
- ۶۷-FILT\_PLOT\_STEP1 (plain | filtered | tapered): تعیین فرمت نگاشت‌های زمانی جهت نمایش در خروجی نهایی مرحله اول برگردان.
- ۶۸-LEN\_PLOT\_STEP1: تعیین طول نگاشت‌های لرزه‌ای زمانی جهت نمایش در خروجی نهایی مرحله اول برگردان.
- ۶۹-MISFIT\_SDS\_RANGE: تعیین بازه مورد نظر (بر حسب درجه) حول بهترین مقادیر به دست آمده برای زوایای امتداد، شیب و بردار لغزش در نمودارهای خطای نسبی.
- ۷۰-SW\_APPDURATION (True | False): تعیین سریع جهت‌یافتگی چشمه زمین لرزه بر اساس برگردان زمان برخاست ظاهری، با استفاده از بهترین مدل چشمه دو جفت نیرو به دست آمده در مرحله اول برگردان.
- ۷۱-CC\_SHIFT1: کمینه میزان شیفت زمانی (بر حسب ثانیه) به منظور ایجاد بیشترین میزان همبستگی بین نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی در مرحله دوم برگردان.
- ۷۲-CC\_SHIFT2: بیشینه میزان شیفت زمانی (بر حسب ثانیه) به منظور ایجاد بیشترین میزان همبستگی بین نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی در مرحله دوم برگردان.
- ۷۳-EPIC\_DIST\_MAXLOC: بیشینه فاصله ایستگاهی مورد نظر در مرحله دوم برگردان.
- ۷۴-INV\_MODE\_STEP2: روش اعمال برگردان در مرحله دوم.
- invert\_tnem: سه مرحله برگردان شامل برگردان (۱) زمان مرکزوار، (۲) مکان مرکزوار و (۳) ممان عددی.
- invert\_tne: دو مرحله برگردان شامل برگردان (۱) زمان مرکزوار و (۲) مکان مرکزوار
- grid: استفاده از روش جستجوی شبکه‌ای
- ۷۵-LOOPS\_LOC\_CONF: تعیین تعداد حلقه‌ها در مرحله دوم برگردان. پس از اعمال اولین حلقه از برگردان، شروع حلقه بعدی حول نتایج به دست آمده از حلقه قبل خواهد بود.
- ۷۶-REDUCE\_LOC\_CONF: مشابه با پارامتر REDUCE\_SDS\_CONF.
- ۷۷-REL\_DEPTH\_STEP: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عمق در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۷۸-REL\_DEPTH\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عمق در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۷۹-REL\_DEPTH\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عمق در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۰-REL\_EAST\_STEP: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای طول جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۱-REL\_EAST\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای طول جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۲-REL\_EAST\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای طول جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۳-REL\_NORTH\_STEP: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عرض جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۴-REL\_NORTH\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عرض جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۵-REL\_NORTH\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت بررسی مکان نسبی مرکزوار در راستای عرض جغرافیایی در مرحله دوم برگردان (بر حسب کیلومتر).
- ۸۶-REL\_TIME\_STEP: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی زمان نسبی مرکزوار در مرحله دوم برگردان (بر حسب ثانیه).
- ۸۷-REL\_TIME\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت بررسی زمان نسبی مرکزوار در مرحله دوم برگردان (بر حسب ثانیه).
- ۸۸-REL\_TIME\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت بررسی زمان نسبی مرکزوار در مرحله دوم برگردان (بر حسب ثانیه).
- ۸۹-SW\_VERTICAL\_ST2 (True | False): استفاده از مؤلفه قائم لرزه‌نگاشت‌ها در مرحله دوم برگردان.
- ۹۰-EPIC\_DIST\_MAXKIN: بیشینه فاصله ایستگاهی مورد نظر در مرحله سوم برگردان.
- ۹۱-INV\_MODE\_STEP3: تعیین روش اعمال برگردان در مرحله سوم.
- invert\_rmv: برگردان شعاع شکست، مکان آغاز شکست و سرعت نسبی شکست به طور هم‌زمان.
- invert\_r: برگردان شعاع شکست.
- grid: روش جستجوی شبکه‌ای.
- ۹۲-KIN\_RISETIME: زمان برخاست مورد نظر جهت استفاده در مرحله سوم برگردان.
- ۹۳-REL\_RUPT\_VEL\_S: تعیین گام مورد نظر جهت بررسی سرعت نسبی شکست در مرحله سوم برگردان.
- ۹۴-REL\_RUPT\_VEL\_1: کمینه مقدار مورد نظر جهت بررسی سرعت نسبی شکست در مرحله سوم برگردان.
- ۹۵-REL\_TIME\_2: بیشینه مقدار مورد نظر جهت بررسی سرعت نسبی شکست در مرحله سوم برگردان.
- ۹۶-ST\_GOODSTATIONS (1 | 2): تعیین مرحله برگردان مورد نظر (۱ یا ۲) جهت حذف نگاشت‌های با برازش ضعیف در مرحله سوم برگردان.
- ۹۷-SW\_RELOCATE (True | False): استفاده از مکان و زمان مرکزوار در مرحله سوم برگردان.
- ۹۸-SW\_AUTORISETIME: محاسبه زمان برخاست در مرحله سوم برگردان به عنوان ۰/۳۳ مدت زمان چشمه نقطه‌ای.
- ۹۹-SW\_BPRISETIME: تعیین خودکار یک بازه زمانی قابل قبول برای زمان برخاست در مرحله سوم برگردان، با توجه به مقادیر فیلتر باندپهن مورد استفاده در این مرحله.
- ۱۰۰-MIN\_KIN\_BOTTOM: کمینه مقدار قابل قبول برای مرز پایینی مدل چشمه ایکونال (بر حسب کیلومتر).

## Determination of point and extended source parameters of 5 April 2017 Sefid-Sang earthquake (MI 6.0) in time and frequency domains using KIWI tools

Niksejel, A.<sup>1</sup> and Shomali, Z. H.<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Graduated, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 1 June 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

### Summary

KIWI (Kinematic Waveform Inversion) is a recently developed multi-step inversion tools at the Institute of Geophysics of University of Hamburg. The main aim of developing this method is to perform moment tensor inversion retrieving the point and extended source parameters in regional distances. In KIWI tools, point and kinematic source parameters are retrieved in a sequential process in three inversion steps in time and frequency domains using different inversion methods, parts of waveforms and so on. After the point source inversion done, the method retrieves the radiation pattern, including fault plane parameters, Scalar moment and centroid depth. Also, for large enough earthquakes ( $M_w > 5.5$ ), extended source inversion retrieves finite source parameters such as rupture directivity, rupture area and velocity, rise and rupture time, average slip and nucleation point regarding to the point source centroid location. KIWI tools uses pre-calculated Greens functions, hence, the inversion process is quite fast. Due to the same reason, this method is rendered for automatic real-time retrieval of point and extended source parameters. In general, we can highlight the most important characteristics and applications of KIWI tools as follows: ability of easy implementation for real-time retrieval of source parameters, stability of inversion, rapid directivity detection, no requirements of aftershocks and foreshocks, no limitation in depth and magnitude and ability of retrieving reliable results even in absence of accurate velocity model used to build the Green's functions and large stations azimuthal gap. In this research, we introduce the KIWI tools and use its applications to study of the April 5, 2017 (MI 6.0) Sefidsang-Fariman earthquake. The data used in this research were recorded by permanent broadband stations of International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES) and some global broadband stations from IRIS network at a minimum epicentral distance of 200 kilometers. To have a better evaluation of KIWI tools functionality, we made inversion of source parameters using six different set of information (including IASP91 and IRSC velocity models and the mentioned set of data). Then, the information set including IRSC velocity model and all available data considered as the optimum one. Comparing the obtained results using the optimum set of information and the remaining sets, Maximum difference in centroid depth, Latitude and Longitude is 1.9 kilometer, 0.23 and 0.5 degree related to information sets including only IRIS network data, while there is a good consistency in retrieved focal mechanisms. After all, it is tried to run a sensitivity test using the optimum information set to have a better assessment on KIWI tools stability in source parameters analysis. Based on the achieved results, the erroneous input parameters (e.g. Latitude, Longitude and Depth) had a low influence on our optimum results. The final results in this research represents the centroid of earthquake in a shallow depth (7.1 km) with a magnitude slightly larger than those published by other institutions like USGS ( $M_w$  6.2). Retrieved focal mechanism shows mainly reverse faulting with small dextral strike-slip component dipping north-east which is in a good accordance with the Kashafrud fault characteristics as the closest active fault to the epicenter. Also, extended source inversion revealed mostly unilateral source directivity toward SE with a rupture area, rupture time and approximate average sleep of 300 km<sup>2</sup>, 9.3 seconds and 16 cm.

**Keywords:** KIWI tools, multistep inversion in time and frequency domains, point and extended source parameters, Sefidsang earthquake (MI 6.0).

\* Corresponding author:

shomali@ut.ac.ir