

## بکارگیری الگوریتم ایزولا برای حل تانسور گشتاور زمین لرزه‌های محلی و ناحیه‌ای (مطالعه موردی زمین لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ سیلاخور با بزرگای گشتاوری ۶)

فرزام یمینی‌فرد، استادیار، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

### چکیده

نتیجه دهد و اطلاعات باارزشی را در خصوص سازوکار تغییرشکل در منطقه بدهد. بنابراین شبکه‌های لرزه‌نگاری مدرن علاوه بر اعلام کانون و بزرگی، تانسور گشتاور را نیز به طور خودکار فراهم می‌سازند.

روشهای گوناگونی برای برگردان شکل موجها جهت مطالعه جزئیات زمانی و مکانی گسیختگی و توزیع لغزش منتجه توسعه داده شده است. با توجه به دسترسی سریع به شکل موجهای ناحیه‌ای پس از وقوع زمین‌لرزه محاسبه سریع پارامترهای فیزیکی چشمه زمین‌لرزه‌ها به ویژه برای تهیه نقشه‌های هم‌شتاب و استفاده در سیستم‌های تخمین خسارت پس از وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب اهمیت پیدا کرده است. روش تانسور گشتاور ناحیه‌ای در حال حاضر در تعدادی از شبکه‌های لرزه‌نگاری چند دقیقه پس از زمین‌لرزه به طور خودکار فراهم می‌شود. تانسورهای گشتاور ناحیه‌ای همچنین برای تشخیص ماهیت انواع چشمه‌های لرزه‌ای مانند فرآیندهای در ارتباط با آتشفشان، انفجارات اتمی یا ریزشهای ناشی از استخراج معدن کاربرد دارند.

برای برگردان داده‌های دور به مدل‌های تانسور گشتاور چشمه نقطه‌ای یا چندگانه شامل مدل‌های توزیع لغزش، الگوریتم‌های متعددی در دسترس هستند [۱-۳]. برای برگردان داده‌های ناحیه‌ای نیز برای مثال می‌توان از الگوریتم‌های درگر و هلمبرگر [۱] و هرمن و آمون [۴] نام برد.

بدیهی است که مطالعات محلی و ناحیه‌ای در مقایسه با مطالعات دور پیچیده‌تر هستند. در فواصل کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر سیگنالها غالباً از فرکانسهای بالا تشکیل شده و فازهای تداخلی مانند  $Lg$  فاز غالب بوده و اثرات حوزه نزدیک می‌توانند مهم باشند. در این حالت برای تولید میدان موج کامل روشهای

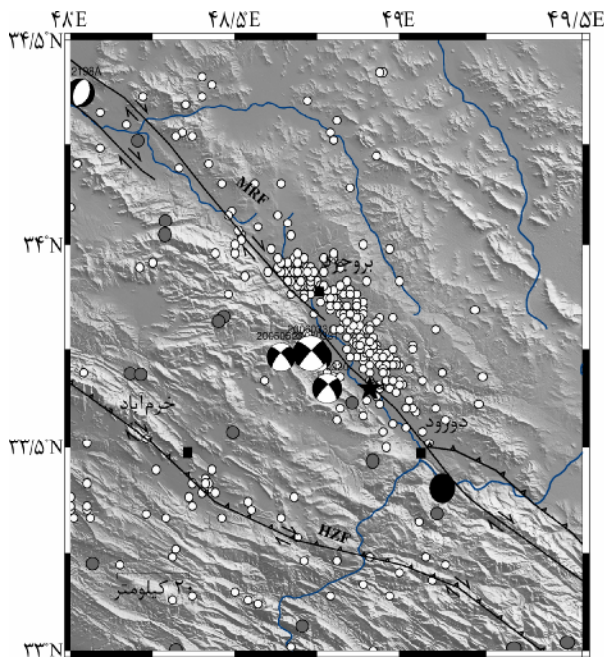
در این مقاله، الگوریتم ایزولا<sup>۱</sup> برای حل تانسور زمین-لرزه‌های محلی و ناحیه‌ای با ذکر یک مثال از کاربرد آن برای زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ سیلاخور با بزرگای گشتاوری ۶ معرفی می‌گردد. در این الگوریتم، روش واهمامیخت تکراری برای تمام شکل موج به کار گرفته شده و تابع گرین با روش عدد موج ناپیوسته محاسبه می‌شود. برگردان تانسور گشتاور انحرافی زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور لغزش امتدادلغز با کمی مؤلفه نرمال در امتداد گسل عهد حاضر با عمق سنترئوئید ۱۱ کیلومتر را نشان می‌دهد. گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده برای این زمین‌لرزه  $10^{18} \times 1/086$  نیوتن متر می‌باشد که بزرگای گشتاوری ۶ را نتیجه می‌دهد. مقایسه حل تانسور گشتاور زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور محاسبه شده با این الگوریتم با حل‌های ارائه شده برای این زمین‌لرزه با روشهای دیگر نشان‌دهنده قابل اعتماد بودن آن برای تخمین آسان و سریع تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ رخ داده شده در ایران توسط مرکز ملی لرزه‌نگاری باند پهن ایران می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** الگوریتم ایزولا، تابع گرین، تانسور گشتاور، سیلاخور، زاگرس

### ۱- مقدمه

شناخت دقیق پارامترهای چشمه لرزه‌ای برای فهم فرآیندهای فیزیکی در زون گسلی طی وقوع زمین‌لرزه‌ها یک پیش‌نیاز است. اگر چه اطلاعات مهمی از چند ثانیه اول نگاشت‌های لرزه‌ای مانند محل و حل صفحه کانونی قابل استخراج است؛ اما برای جزئیات تمامی نگاشت بایستی تمامی آن مورد ملاحظه قرار گیرد. این نوع مطالعات می‌تواند عمق کانونی و گشتاور لرزه‌ای را با دقت بیشتری

زلزله ۳۳/۶۲ درجه عرض شمالی و ۴۸/۹۱ درجه طول شرقی تعیین شده است. در اثر این زمین‌لرزه حدود ۷۰ نفر جان باختند و بسیاری از روستاهای اطراف رومرکز خسارت دیدند. یکی از دلایلی که باعث جلوگیری از تلفات جانی زیاد این واقعه شد، رخداد پیش‌لرزه‌های نسبتاً بزرگ روز قبل از زلزله اصلی در منطقه بود. بزرگای محلی پیش‌لرزه‌ها به ترتیب ۴/۶ و ۵/۱ بوده و در ساعات ۱۹:۴۷ و ۲۳:۰۶ به وقت محلی رخ داده‌اند. این زمین‌لرزه در مجاورت قطعه دورود گسل عهد حاضر<sup>۱۰</sup> تعیین محل شده و محل وقوع یکی از بزرگترین زمین‌لرزه‌های دستگاهی زاگرس در سال ۱۹۰۹ میلادی با بزرگای ۷/۴ در مقیاس امواج سطحی بوده که در اثر آن بیش از ۴۰ کیلومتر گسلش سطحی صورت گرفته است [۷]. از این رو، مطالعه زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور به عنوان تنها زمین‌لرزه بزرگ دستگاهی در امتداد قطعه دورود گسل عهد حاضر از اهمیت زیادی برخوردار است.



شکل (۱): نقشه لرزه‌خیزی منطقه بر اساس کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (دایره‌های سفید رنگ) و انگدال (دایره‌های طوسی رنگ) به همراه ساز و کارهای کانونی بر اساس حل تانسور گشتاور دانشگاه هاروارد. دایره مشکی رنگ رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۰۹ دورود با بزرگای ۷/۴ در مقیاس امواج سطحی [۸] و ستاره رومرکز زمین‌لرزه ۱۱ فروردین سال ۱۳۸۵ ه.ش با بزرگی گشتاوری ۶ را نشان می‌دهد. گسل‌های مهم منطقه از حسامی و همکاران [۹].

پرتو<sup>۲</sup> که برای فواصل دور کاربرد دارند با روشهای تمام موج<sup>۳</sup> جایگزین می‌شوند. روشهای متعدد فرکانس - عدد موج<sup>۴</sup> مانند روش عدد موج ناپیوسته<sup>۵</sup> بوشون [۵] می‌تواند در این حالت به کار گرفته شود. از آنجایی که مدل‌های یک بعدی سرعت، متوسط مدل حقیقی زمین و شامل جزئیات آن نمی‌باشند، با اعمال فیلتر پایین گذر فرکانسهای پایین از نگاشتها استخراج و مدلسازی می‌شود. بنابراین انتخاب نگاشتهای با کیفیت سیگنال به نوبه مناسب، پردازش دقیق آنها و انتخاب باند فرکانسی مناسب بسیار مهم است.

الگوریتم معرفی شده در این مقاله، ایزولا یک بسط روش کیکوچی و کاناموری [۲] برای فواصل محلی و ناحیه‌ای است که در آن تمام شکل موج ملاحظه شده و توابع گرین با استفاده از روش عدد موج ناپیوسته ارائه شده توسط بوشون [۵] محاسبه می‌شود [۶]. در روش کیکوچی و کاناموری [۲]، چشمه مجموعه‌ای از چشمه‌های نقطه‌ای در نظر گرفته شده و زیر رویدادها با روش برگردان واهمامیخت تکراری<sup>۶</sup> از شکل موجها تعیین می‌شوند. این در صورتی است که در روش برگردان به کار گرفته شده توسط درگر و هلمبرگر [۱] برای افزایش سرعت محاسبات، چشمه در زمان و مکان نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود و از تغییرات حجمی چشمه صرف‌نظر می‌شود. بنابراین فقط بخش انحرافی<sup>۷</sup> تانسور گشتاور با روش حداقل مربعات خطی حل می‌شود. بخش انحرافی به سه بخش گشتاور لرزه‌ای اسکالر، تانسور گشتاور جفت نیرو<sup>۸</sup> و تانسور گشتاور دو قطبی برداری خطی جبران شده<sup>۹</sup> CLVD تجزیه می‌شود. در این روش عمق با روش تکرار از حلی که بیشینه کاهش واریانس را نتیجه می‌دهد، تعیین می‌شود.

## ۲- زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ۱۳۸۵ سیلاخور

در ساعت ۴:۴۷ بامداد (به وقت محلی) روز ۱۱ فروردین سال ۱۳۸۵ ه.ش، زمین‌لرزه‌ای با بزرگی محلی ۶/۱ در منطقه درب آستانه از توابع بخش سیلاخور شهرستان دورود (نزدیک به شهر بروجرد) به وقوع پیوست، شکل (۱). مختصات رومرکز این زمین‌لرزه توسط شبکه لرزه‌نگاری وابسته به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی

منطقه حول قطب اوپلر می‌دانند.

اندازه‌گیریهای *GPS* نشان داده است که میزان کوتاه‌شدگی در شمال شرق زاگرس که شامل منطقه مورد مطالعه می‌شود، ناچیز است که به کاهش سرعت واگرایی و/یا فرار پوسته از کوتاه‌شدگی به علت وجود لغزش امتدادلغز نسبت داده شده است [۱۳]. این مطالعه نشان می‌دهد که در این بخش از زاگرس تغییرشکل بین ۴-۶ میلیمتر حرکت امتدادلغز در امتداد گسل‌های با امتداد شمال-غرب، جنوب-شرق و ۳-۶ میلیمتر کوتاه‌شدگی عمود بر محور رشته کوهها تقسیم شده است. بر اساس همین اندازه‌گیریها، حرکت امتدادلغز گسل عهد حاضر ۲-۳ میلیمتر در سال محاسبه شده است. ملک‌زاده و همکاران [۱۴] با مطالعات ساختاری و ژئومورفولوژی و مشاهده حرکت امتدادلغز روی زاگرس بلند نشان دادند که این گسل علاوه بر گسل عهد حاضر در تقسیم‌شدگی استرین در منطقه زاگرس بلند در شمال زاگرس نیز نقش دارد.

#### ۴- روش

تانسور گشتاور  $M_{ij}$  با ترکیبی خطی شش تانسور بنیادی<sup>۱۲</sup>  $M_n$  بیان می‌شود، شکل (۲).  $M_1$  و  $M_2$  گسل‌های امتدادلغز خالص؛  $M_3$  و  $M_4$  گسل‌های شیب‌لغز با صفحه قائم به ترتیب در امتداد شمال-جنوب و شرق-غرب و  $M_5$  گسل شیب‌لغز با شیب ۴۵ درجه را نشان می‌دهد.  $M_6$  چشمه همسانگرد<sup>۱۳</sup> که انرژی را به طور مساوی در تمام جهات تشعشع می‌کند (مانند انفجار) را بیان می‌کند. به طور کلی  $M$  می‌تواند به دو بخش همگن<sup>۱۴</sup> و انحرافی تقسیم شود. تانسور گشتاور انحرافی با پنج تانسور گشتاور بنیادی  $M_1$  تا  $M_5$  بیان می‌شود. تجزیه  $M$  یکتا است، اما تجزیه تانسور گشتاور انحرافی یکتا نمی‌باشد. معمولاً بخش انحرافی تانسور گشتاور به دو بخش جفت نیرو و *CLVD* تقسیم می‌شود. اغلب مؤلفه‌های *CLVD* مهم<sup>۱۵</sup> برای زمین‌لرزه‌های بزرگ با عمق متوسط<sup>۱۶</sup> و عمیق<sup>۱۷</sup> گزارش می‌شود. در بسیاری از حالات به هر حال می‌توان نشان داد که این مقادیر زیاد نتیجه انطباق چندین واقعه گسیختگی با سازوکارهای جفت نیرو مختلف می‌باشد [۱۵]. درصد جفت نیرو<sup>۱۸</sup> برای وقایع مرکب به باند

آنالیز تصاویر رادار برای اندازه‌گیری تغییرشکل و سینماتیک زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور با حرکت امتدادلغز راستگرد حاصل از گسیختگی ۲۰ کیلومتر از قطعه دورود گسل عهد حاضر در عمق بین ۲ تا ۸ کیلومتر با بیشترین لغزش به مقدار ۹۰ سانتیمتر در عمق ۴ کیلومتر در زیر روستای چالان چولان سازگاری دارد. نتایج مدلسازی امواج حجمی عمق ۶ کیلومتر را برای این زمین‌لرزه نتیجه داده است. شیب و امتداد گسل با هر دو روش فوق‌الذکر به ترتیب ۶۰ و ۳۲۰ درجه محاسبه شده است [۱۰].

#### ۳- تکتونیک و سینماتیک منطقه

در سمت شمال‌غرب زاگرس مجموعه‌ای اصلی از گسل‌های امتدادلغز راستگرد با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی به طول تقریبی ۸۰۰ کیلومتر (از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی تا ۳۷ درجه شمالی) هم امتداد با خطواره راندگی زاگرس واقع است. این مجموعه گسلی که همان گسل اصلی عهد حاضر است [۷]، عنصر عمده‌ای در زمینساخت جنبای خاورمیانه به شمار می‌رود و مسؤول وقوع چندین زمین‌لرزه بزرگ در منطقه می‌باشد [۱۱]. قطعه گسلی دورود با راستای حدود ۳۱۵ و در ازای بالغ بر ۱۰۰ کیلومتر، جنوبی‌ترین قطعه گسلی گسل عهد حاضر محسوب می‌گردد. گسل دورود در شمال غربی شهر دورود حد جنوبی دره سیلاخور را در نهشته‌های کواترنری پسین رودخانه آبی دز تشکیل می‌دهد. سازوکار گسل دورود امتدادلغز راستگرد همراه با یک مؤلفه قائم کوچک می‌باشد [۷]. اندازه‌گیریهای ترازایی و آنالیز تصاویر رادار افتادگی حدود ۲ سانتیمتر در قسمت شمالی و بالاآمدگی حدود ۶ سانتیمتر در قسمت جنوبی را طی بازه دو ساله تا پس از وقوع زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور نشان می‌دهد که می‌تواند تأییدی بر وجود حوزه کششی در منطقه باشد [۸].

طالبیان و جکسون [۱۱] در مطالعه خود بر وجود مؤلفه نرمال و حوزه کششی<sup>۱۱</sup> در بخش شمالی زاگرس (*MRF*) اشاره داشته و کوبلی و جکسون [۱۲] نیز به بیان شواهدی بر وجود آنها در بخش شمالی‌تر آن پرداخته‌اند. این محققین وجود این اثرات را ناشی از اختلاف در سرعت چرخش

می‌دهد. در این روش هنگامی که زیر رویداد اصلی پیدا شد لرزه‌نگاشت مصنوعی مربوطه از لرزه‌نگاشت مشاهده شده کم و شکل موج باقیمانده برای چشمه نقطه‌ای دیگر برگردان و این عمل ادامه می‌یابد. از آنجایی که در این روش موقعیت چشمه بهینه نیز تعیین می‌شود غیرخطی است [۱۶].

با در نظر گرفتن  $d$  به عنوان داده مشاهده شده و  $s$  به عنوان شکل موج ساختگی، میزان تطابق<sup>۲۴</sup> بین آنها با مقدار کاهش واریانس اندازه‌گیری می‌شود:

$$varred = 1 - |d - s^2| / |d^2|$$

که در آن عملگر  $L1$  نرم  $L2$ ، یعنی  $Ld^2 = \sum(d_i)^2$  و از جمع تمام سریهای زمانی، سه مؤلفه برای تمامی ایستگاهها محاسبه می‌شود. مقدار بهینه در حالت تطابق کامل برابر یک می‌باشد.

## ۵- مراحل حل تانسور گشتاور

عموماً کیفیت برگردان تانسور گشتاور به مقدار زیادی به تعداد داده قابل دسترس و توزیع آزیموتی ایستگاه در اطراف چشمه بستگی دارد [۱۷]. مدل سرعت به کار رفته و موقعیت مکانی زمین‌لرزه نیز از عواملی هستند باعث خطا در محاسبات می‌شوند. در زیر به طور خلاصه مراحل برگردان تانسور گشتاور با مدلسازی شکل موج ارائه شده است:

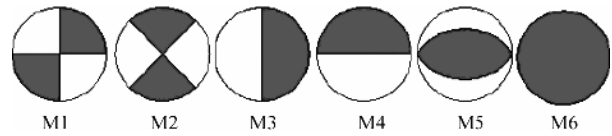
۱- جمع‌آوری داده و پیش پردازش شامل: نسبت خوب سیگنال به نوفه؛ سیگنالهای بریده نشده<sup>۲۵</sup>؛ پوشش ایستگاهی مناسب؛ حذف مقدار متوسط و تمایل<sup>۲۶</sup> خطی؛ تصحیح پاسخ دستگاهی و تبدیل لرزه‌نگاشت سرعت به جابه‌جایی؛ اعمال فیلتر پایین گذر برای حذف نوفه فرکانس بالا و بکارگیری تقریب چشمه نقطه‌ای؛

۲- محاسبه توابع گرین وابسته به: مدل زمین؛ محل زمین-لرزه؛ موقعیت ایستگاه؛

۳- برگردان: انتخاب شکل موجها برای مثال  $SH$ ،  $P$  یا تمام لرزه‌نگاشت؛ تطابق شکل موجها با نگاشت مصنوعی متناظر؛ تجزیه تانسور گشتاور (برای مثال به دو بخش جفت نیرو و  $CLVD$ ).

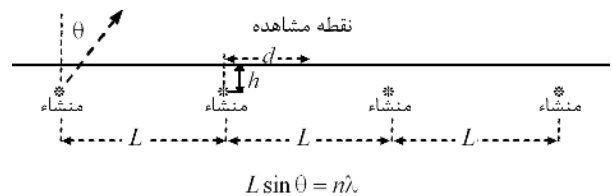
برگردان می‌تواند هم در حوزه زمان و هم حوزه فرکانس

فرکانسی مطالعه شده و آزیموت ایستگاه وابسته است که می‌تواند علت اختلاف زیاد بین درصد  $DC$  گزارش شده توسط آژانسهای مختلف باشد [۱۶].



شکل (۲): تانسورهای گشتاور به کار رفته در برگردان تانسور گشتاور کامل<sup>۱۹</sup> [۲].

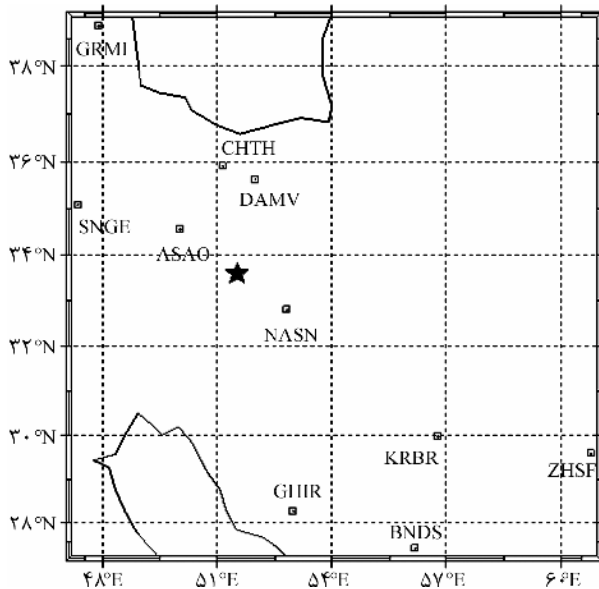
توابع گرین در این الگوریتم با استفاده از روش عدد موج ناپیوسته ارائه شده توسط بوشون، ۱۹۸۱ محاسبه می‌شود. روش عدد موج ناپیوسته  $DWN$ <sup>۲۰</sup> یک راه برای محاسبه دقیق توابع گرین برای بسیاری از مسائل با حداقل عملیات ریاضی فراهم ساخته است. در این روش، مسأله چشمه منفرد با مسأله چشمه چندتایی که به صورت پرئودیک توزیع شده است، جایگزین می‌گردد، شکل (۳).



شکل (۳): تفسیر فیزیکی روش  $DWN$ . چشمه منفرد با یک آرایه نامحدود چشمه‌های توزیع شده بطور افقی با فاصله برابر  $L$ . برای یک طول موج تشعشع معین  $\lambda$  مطابق با یک فرکانس تهیه‌یج، انرژی الاستیک فقط در جهات ناپیوسته  $\theta$  تشعشع می‌کند [۵].

الگوریتم به کار رفته در نرم‌افزار ایزولا برای برگردان تانسور گشتاور همان الگوریتم کیکوچی و کاناموری [۲] است که در آن چشمه مجموعه‌ای از چشمه‌های نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. تانسور گشتاور زیر رویدادها به طور متوالی با کمینه‌سازی اختلاف بین شکل موجهای مشاهده شده<sup>۲۱</sup> و ساختگی<sup>۲۲</sup> با روش جستجو در مش<sup>۲۳</sup> برای مقادیر مختلف پارامترهای چشمه شامل زمان و مکانهای پیش‌فرض شده تعیین می‌شوند. بیشینه همبستگی بین شکل موجهای مشاهده شده و ساختگی زمان و موقعیت بهینه را نشان

تانسور گشتاور این زمین‌لرزه در حوزه زمان مورد بررسی قرار گرفت، شکل (۴). جهت تعیین توابع گرین از مدل عباسی و همکاران [۱۹] استفاده گردید، جدول (۱).



شکل (۴): موقعیت جغرافیایی ده ایستگاه باندپهن ثبت‌کننده زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور. ستاره رومرکز زمین‌لرزه می‌باشد.

جدول (۱): مدل سرعت به کار رفته جهت محاسبه تابع گرین [۱۹].

لایه	مرز بالای لایه (km)	سرعت موج P (Km/s)	سرعت موج S (Km/s)
۱	۰	۵/۴	۳/۱
۲	۳	۵/۸	۳/۴
۳	۷	۶/۱	۳/۵
۴	۱۶	۶/۲۵	۳/۶
۵	۲۴	۶/۴	۳/۷

جهت حل تانسور گشتاور انحرافی، فیلترهای با پهنای باند متفاوت بین ۰/۰۱ و ۰/۱ هرتز بررسی گردید و در نهایت با فیلتر میان‌گذر ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۵ هرتز بیشترین متوسط کاهش واریانس یعنی ۴۴ درصد و بیشترین مؤلفه جفت نیرو (DC) یعنی ۸۳ درصد حاصل گردید، شکل (۵). این حل نشان‌دهنده ساز و کار کانونی غالب امتدادلغز در امتداد شمال‌غرب جنوب‌شرق با مؤلفه ناچیز نرمال می‌باشد، شکل (۶) و جدول (۲). جهت اطمینان از پایداری جواب عمل برگردان برای داده‌های فیلتر شده در باندهای دیگر نیز انجام شد و تغییر محسوسی در تانسور گشتاور محاسبه شده حاصل نگردید.

انجام شود. بایستی در انطباق لرزه‌نگاشت‌های مشاهده شده و مصنوعی دقت شود. این عمل با تکنیک‌های همبستگی عرضی<sup>۲۷</sup> آسانتر می‌شود. در بیشتر برگردانها عمق کانونی ثابت فرض می‌شود. برگردان برای گستره‌ای از عمق‌های کانونی انجام شده و بهترین حل به عنوان حل با حداقل واریانس تخمین یا بیشترین همبستگی انتخاب می‌شود.

کیفیت برگردان تانسور گشتاور یا هر برگردان چشمه به توابع گرین به کار رفته وابسته است. چندین مدل سرعت ممکن است به کار گرفته شود تا تغییرات ناحیه‌ای ساختار پوسته منظور گردد. فیلتر میان‌گذر ۰/۰۲-۰/۰۵ و ۰/۰۲-۰/۱ هرتز هنگامی که ساختار سرعتی تخت ساده به کار می‌رود، توصیه می‌گردد. فوکومویا و درگر [۱۸] فیلتر میان‌گذر ۰/۰۲-۰/۱ هرتز را برای زمین‌لرزه‌های کوچکتر از ۴، ۰/۰۲-۰/۰۵ هرتز را برای زمین‌لرزه‌های بین ۴ تا ۵، ۰/۰۱-۰/۰۵ هرتز را برای زمین‌لرزه‌های بزرگتر از ۵ و ۰/۰۵-۰/۰۲ هرتز را برای زمین‌لرزه‌های بزرگتر از ۷/۵ پیشنهاد داده‌اند.

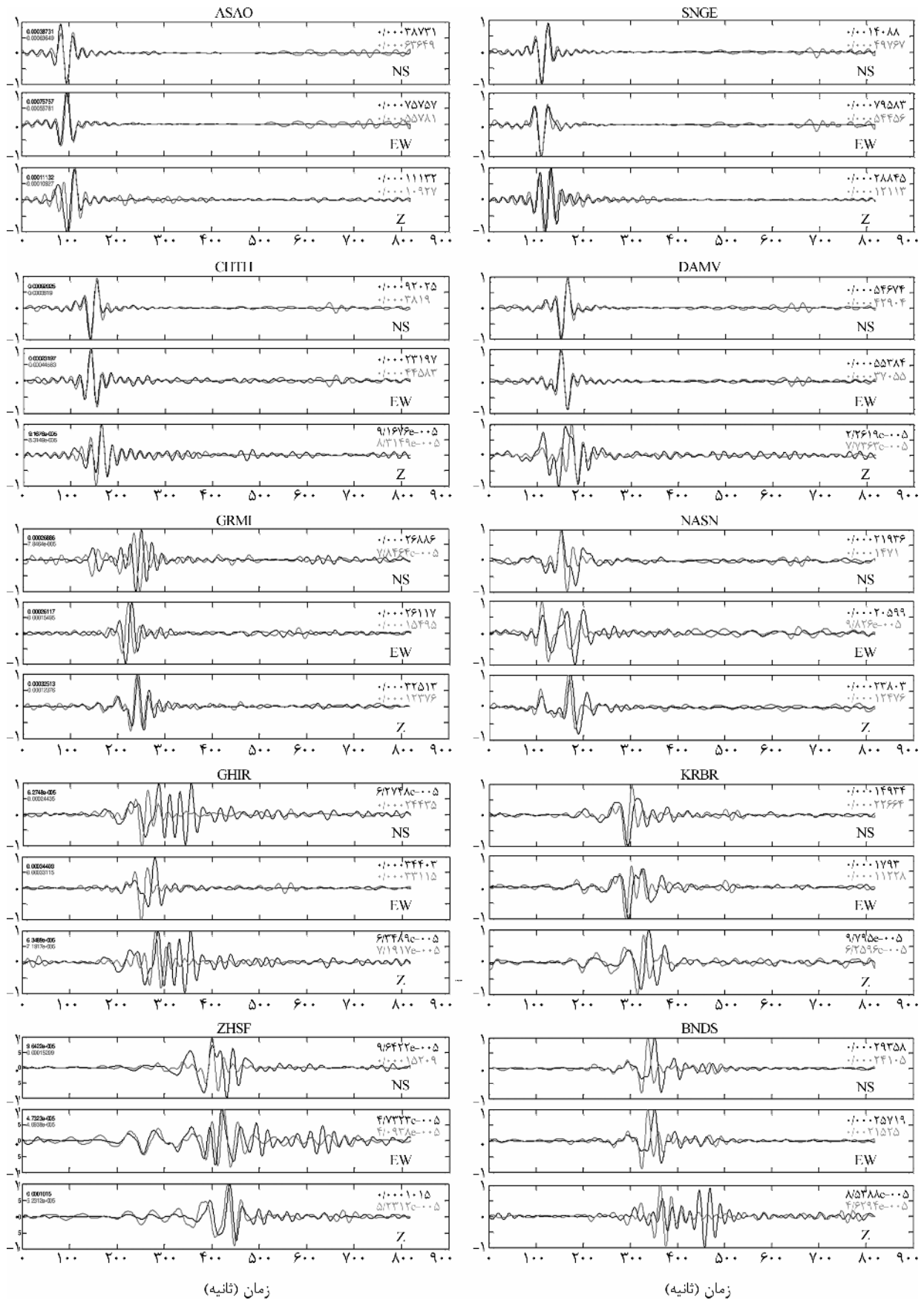
به طور کلی حل‌های نامطمئن تانسور گشتاور برای

چشمه با روش‌های زیر قابل بررسی هستند [۱۶]:

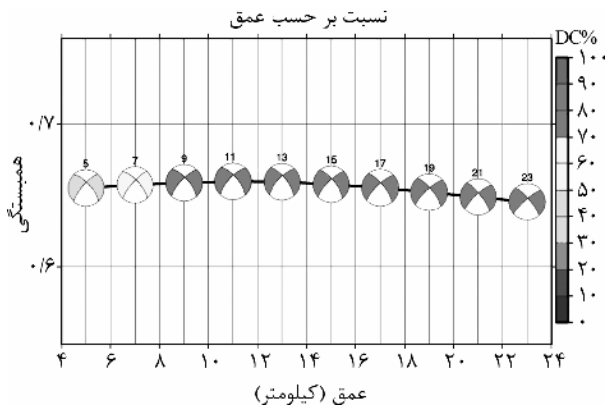
- بررسی پایداری حل با مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری زیر مجموعه متفاوت داده؛
- بررسی تغییرات حل ساز و کار کانونی با مقادیر متفاوت محل رویداد؛
- عدم توافق پلاریته بارز بین داده‌های واقعی و مصنوعی؛
- مقادیر بسیار کم درصد جفت نیرو؛
- مقادیر کم کاهش واریانس؛
- اختلاف زیاد عمق حاصل از تانسور گشتاور و تعیین محل‌های انجام گرفته با روش‌های معمول؛
- مقادیر کوچک نسبت حداقل به حداکثر مقادیر ویژه.

## ۶- حل تانسور گشتاور زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور

با توجه به ثبت زمین‌لرزه ۱۱ فروردین ماه ۱۳۸۵ سیلاخور توسط ایستگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن ایران وابسته به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ساز و کار کانونی این زمین‌لرزه با برگردان



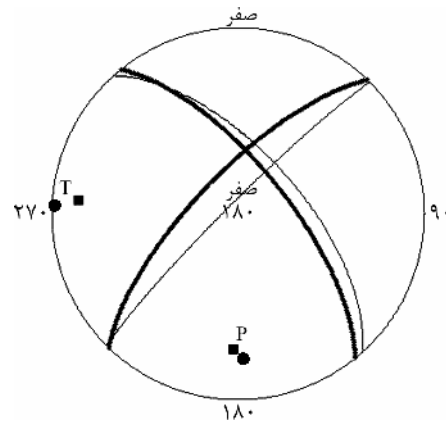
شکل (۵): مقایسه شکل موج جابه‌جایی زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور (شکل موج مشکی رنگ) با شکل موجهای مصنوعی (شکل خاکستری رنگ) حاصل از برگردان تانسور گشتاور در حوزه زمان با بکارگیری فیلتر میان‌گذر ۰/۱۵ تا ۰/۰۵. هر تیز: محور قائم جابه‌جایی نرمالیزه شده بر حسب متر می‌باشد. اعداد گوشه سمت چپ پیشینه هر نگاشت هستند.



شکل (۷): همبستگی (مجذور کاهش واریانس) بر حسب عمقهای سنتروئید در بازه ۵ تا ۲۳ کیلومتر نشان‌دهنده بیشترین همبستگی در عمق ۱۱ کیلومتر می‌باشد.

ساز و کار محاسبه شده در این مطالعه با سازوکار کانونی محاسبه شده توسط پیرت و همکاران [۱۰] همخوانی نسبتاً خوبی نشان می‌دهد، شکل (۶) و جدول (۲).

جهت اعتبارسنجی تانسور گشتاور محاسبه شده عمل برگردان با تغییر پارامترهای اولیه مانند رومرکز و عمق، تغییر بازه فرکانسی فیلتر میان‌گذر و استفاده از گروههای متفاوت ایستگاهها تکرار گردید. این آزمون نشان می‌دهد که در حالت‌های بررسی شده ساز و کار محاسبه شده غالباً امتداد لغز با کمی مؤلفه نرمال می‌باشد. بیشترین اختلاف، زمانی مشاهده شد که برگردان با دو گروه ایستگاههای نزدیک (*CHTH, DAMV, NASN, ASAO, SNGE*) و گروه ایستگاههای دور (*GRMI, GHIR, KRBR, BNDS, ZHSF*) انجام شد. نتایج این آزمون نشان می‌دهد که استفاده از ایستگاههای



شکل (۶): مقایسه ساز و کار کانونی حل شده با استفاده از مدل‌سازی امواج دور (ساز و کار مشکی کم رنگ [۸] و حل تانسور گشتاور با استفاده از مدل‌سازی امواج ناحیه‌ای توسط الگوریتم ایزولا (ساز و کار مشکی پر رنگ).

بازه فیلتر انتخابی بسیار نزدیک به بازه پیشنهادی توسط فوکویاما و درگر [۱۸]،  $0.01$  تا  $0.05$  هرتز است با این تفاوت که فرکانس گوشه<sup>۲۸</sup> پایینی با توجه به سطح زیاد نوفه بلند دوره<sup>۲۹</sup> در ایستگاهها از  $0.01$  به  $0.15$  هرتز افزایش یافته است. ساز و کار کانونی محاسبه شده برای این زمین‌لرزه با روشها و داده‌های متفاوت در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه نتیجه برگردان برای عمقهای بین ۵ تا ۲۳ کیلومتر بهترین ضریب همبستگی برای عمق سنتروئید ۱۱ کیلومتر به دست آمد، شکل (۷).

گشتاور لرزه‌ای برای این زمین‌لرزه برابر  $1.086 \times 10^{18}$  نیوتن متر محاسبه گردید که با استفاده از رابطه بزرگی گشتاور هنکس و کاناموری [۲۰] بزرگای گشتاوری ۶ را نتیجه می‌دهد.

جدول (۲): مقایسه سازوکار کانونی محاسبه شده برای زمین‌لرزه ۳۸۵ سیلاخور با روشهای متعدد. (۱) پیرت و همکاران [۱۰]؛ (۲) حاتمی و همکاران [۲۱].

مدل	امتداد	شیب	ریک	عمق سنتروئید (کیلومتر)	طول (کیلومتر)	پهنا (کیلومتر)	لغزش متوسط (متر)	گشتاور (Nm)	Mw
USGS PDE	۳۱۴	۵۴	۱۸۰					$1 \times 10^{18}$	
Harvard CMT	۳۱۳	۷۸	-۱۷۴	۱۲				$1/71 \times 10^{18}$	
Body wave (۱)	۳۱۸	۶۳	۶	۶				$1/52 \times 10^{18}$	۶/۱
InSAR (۱)	۳۲۰	۶۰	۱۸۰		۱۳/۵	۳/۹	۱/۰۷	$1/7 \times 10^{18}$	
InSAR	۳۲۰	۶۰	۱۸۰		۲۰	۶	۰/۴	$1/58 \times 10^{18}$	
TDMT- INVC (۲)	۳۲۰	۷۰	۱۷۹	۲۰				$7/13 \times 10^{25}$	۶/۵
ISOLA	۳۲۱	۶۹	-۱۶۱	۱۱				$1/0.86 \times 10^{18}$	۶/۰

گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده برای این زمین‌لرزه  $10^{18} \times 1/0.86$  نیوتن‌متر می‌باشد که با استفاده از رابطه بزرگی گشتاور هنکس و کاناموری [۲۰] بزرگای گشتاوری ۶ را نتیجه می‌دهد. این حل شامل ۸۳ درصد مؤلفه جفت نیرو بوده و ۴۴ درصد واریانس را کاهش داده است.

حل تانسور گشتاور زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور محاسبه شده با الگوریتم ایزولا با حل‌های ارائه شده برای این زمین‌لرزه با روش‌های دیگر [۱۰، ۲۱] همخوانی خوبی نشان می‌دهد، شکل (۶) و جدول (۲). در هر صورت دستیابی به نتایج دقیق‌تر نیاز به کاربرد الگوریتم برای زمین‌لرزه‌های بیشتر با بزرگای متفاوت در مناطق مختلف ایران، کالیبره کردن مدل سرعت، انتخاب بازه فرکانسی مناسب و ضریب کیفیت<sup>۳</sup> مناسب و در نهایت پوشش ایستگاهی بهتر شبکه دارد.

## ۸- منابع

1. Dreger, D.S. and Helmberger, D.V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 8107-8125.
2. Kikuchi, M. and Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves-III, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 2335-2350.
3. McCaffrey, R., Abers, G., and Zwick, P. (1991). Inversion of teleseismic body waves, In: Lee, W.H.K. (Ed.), *Digital seismogram analysis and waveform inversion*, International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, El Cerrito, CA., 81-166.
4. Hermann, R.B. and Ammon, C.J. (2002). Computer programs in seismology, Source inversion, [http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon, HTML/MTinv Docs/mtinv01.html](http://eqseis.geosc.psu.edu/~cammon_HTML/MTinv_Docs/mtinv01.html).
5. Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**(4), 959 - 971.
6. Sokos, E. and Zahradnik, J. (2008). ISOLA a fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data, *Computers and Geosciences*, **34**, 967-977.

دور مؤلفه نرمال بیشتری را نسبت به حالت استفاده از ایستگاه‌های نزدیک نشان می‌دهد و درصد کاهش واریانس تنها ۷ درصد در مقابل ۶۰ درصد استفاده از ایستگاه‌های نزدیک می‌باشد. پس نتیجه گرفته می‌شود که نتایج حاصل از استفاده از ایستگاه‌ها واقع شده در فواصل ناحیه‌ای نزدیک‌تر به نتایج به دست آمده از روش‌های دیگر نزدیک‌تر است. هر چند بررسی انجام گرفته توسط زاهراندیک و همکاران [۱۶] نشان می‌دهد که ایستگاه‌های بسیار نزدیک (کمتر از ۲۰ کیلومتر) به خصوص برای زمین‌لرزه‌های کم عمق به علت عدم دقت مدل‌های سرعت به کار گرفته شده در این عمق‌ها باعث خطای قابل توجه در نتایج می‌شود.

مقایسه نتایج به دست آمده از این مطالعه با استفاده از تمامی ده ایستگاه با حل‌های ارائه شده برای زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور، جدول (۲)، درصد بالای مؤلفه جفت نیرو، توافق قطبش اولین رسید موج با حل به دست آمده، پایداری نتایج علی‌رغم تغییر پارامترهای اولیه مانند رومرکز و عمق، استفاده از گروه داده‌ها و فیلترهای با باندگذر متفاوت و مقدار نسبت حداقل مقدار ویژه ماتریس سیستم به مقدار حداکثر آن نشان‌دهنده تخمین قابل اطمینان ساز و کار غالب زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور با استفاده از داده‌های ناحیه‌ای می‌باشد. بدیهی است که مقادیر مطلق پارامترها می‌تواند تا حد زیادی متأثر از نوفه بلند دوره و دقت مدل سرعت به کار رفته باشد. افزایش تعداد داده‌ها با پوشش آزمون‌های مناسب چشمه از عواملی مهمی هستند که باعث افزایش دقت نتایج می‌شوند. پوشش آزمون‌های زمین‌لرزه سیلاخور نشان‌دهنده عدم پوشش مناسب در بخش‌های جنوبی رومرکز می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

جهت حل تانسور گشتاور زمین‌لرزه ۱۳۸۵ سیلاخور داده‌های فیلتر شده ۱۰ ایستگاه بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۵۵ هرتز در حوزه زمان برگردان شدند. عمق سنتروئید نیز در بازه ۵ تا ۲۳ کیلومتر جهت دستیابی به حل با بیشترین همبستگی آزمایش شدند. برگردان تانسور گشتاور انحرافی این زمین‌لرزه لغزش امتدادلغز با کمی مؤلفه نرمال در امتداد گسل عهد حاضر با عمق سنتروئید ۱۱ کیلومتر را نشان می‌دهد.



- Detailed waveform inversion for moment tensors of  $M \sim 4$  events; examples from the Corinth Gulf, Greece, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 2756-2771.
17. Dufumier, H. (1996). On the limits of moment tensor inversions of teleseismic body wave spectra, *PAGEOPH*, **147**(3), 467-482.
18. Fukuyama, E. and Dreger, D. (2000). Performance test of an automated moment tensor determination system for the future "Tokai" earthquake, *Earth Planets Space*, **52**, 383-392.
19. Abbassi, A., Nasrabadi, A., Tatar, M., Yaminifard, F., Abbassi, M.R., Hatzfeld, D., and Priestley, K. (2010). Crustal velocity structure in the southern edge of the Central Alborz (Iran), *Journal of Geodynamics*, **49**, 68-78.
20. Hanks, T. and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, **84**(B5), 2348-2350.
21. Hatami, M.R., Shomali, Z.H., and Javan-Doloei, Gh. (2009). Focal mechanisms of Mw 6.5 Iran-Silakhor earthquake using data from the Iranian Seismic Network, *Journal of the Earth and Space Physics*, **35**(3), 1-11.
7. Tchalenko, J. and Braud, J. (1974). Seismicity and structure of the Zagros (Iran), the main recent fault between 33 and 35° N, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **277**, 1-25.
8. Ambraseys, N.N. and Melville, C.P. (1982). A history of Persian Earthquakes, Cambridge Earth Science Series. Cambridge University Press, London, 212p.
9. حسامی، خالد، جمالی، فرشاد و طیبی، هادی (۱۳۸۲). نقشه گسل‌های فعال ایران، مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
10. Peyret, M., Rolandone, F., Dominguez, S., Djamour, Y., and Meyr, B. (2008). Source model for the Mw 6.1, 31 March 2006, Chalan-Chulan Earthquake (Iran) from InSAR, *Terra Nova*, **20**, 126-133.
11. Talebian, M. and Jackson, J. (2002). Offset on the main fault recent of the NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia Eurasia collision zone, *Geophys. J. Int.*, **150**, 422 – 439.
12. Copley, A. and Jackson, J.A. (2006). Active tectonics of the Turkish-Iranian Plateau, *Tectonics*, **25**, TC6006, doi:10.1029/2005TC001906.
13. Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chéry, J., and Masson, F., (2006). Difference in the GPS deformation pattern of north and central Zagros (Iran): *Geophys. J. Int.*, **167**, 1077-1088.
14. Malekzade, Z., Abbassi, M.R., Bellier, O., and Authemayou, C. (2007). Strain partitioning in west-central Zagros fold and thrust belt: implication for seismic hazard analysis, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **9**(3), 85-98.
15. Tibi, R., Estabrook, C.H., and Bock, G. (1999). The 1996 June 17 Flores sea and 1994 March 9 Fiji-Tongaa earthquakes: source processes and deep earthquake mechanisms, *Geophys. J. Int.*, **138**, 625-642.
16. Zahradnik, J., Jansky, J. and Plicka, V. (2008).

## ۹- پانویس

- ۱- ISOLA  
 ۲- Ray Method  
 ۳- Full-Wave  
 ۴- Frequency Wavenumber  
 ۵- Discrete Wavenumber  
 ۶- Iterative Disconsolation  
 ۷- Deviatoric  
 ۸- Double-Couple  
 ۹- Compensated Linear Vector Dipole  
 ۱۰- Main Recent Fault  
 ۱۱- Pull Apart  
 ۱۲- Elementary  
 ۱۳- Isotropic  
 ۱۴- Isotropic  
 ۱۵- Significant  
 ۱۶- Intermediate  
 ۱۷- Deep  
 ۱۸- Double Couple  
 ۱۹- Full Moment Tensor  
 ۲۰- Discrete Wavenumber Method  
 ۲۱- Observed

۲۷- *Cross-Correlation*

۲۸- *Corner Frequency*

۲۹- *Long Period*

۳۰- *Quality Factor*

۲۲- *Synthetic*

۲۳- *Grid Search*

۲۴- *Norm*

۲۵- *Unclipped*

۲۶- *Trend*