

تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌های پیچیده با بزرگی متوسط

بابک هجرانی^۱، محمد رضا حاتمی^{۱*} و ظاهر حسین شمالی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۸/۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۷، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۱)

چکیده

در این تحقیق، در ابتدا، با حاصل جمع لرزه‌نگاشت‌های دو رویداد دو زوج نیروی خالص یک چشمه زمین‌ساختی با درصد غیر دو زوج نیروی بالا را مدل‌سازی می‌کنیم. در مرحله بعد به وارون‌سازی خطی لرزه‌نگاشت‌های این چشمه در حوزه زمان خواهیم پرداخت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ممان لرزه‌ای رویداد دوم و کاهش فاصله دو رویداد، درصد دو زوج نیروی تانسور ممان کم می‌شود. همچنین، نتایج وارون‌سازی در حالت دو زوج نیرو نشان داد که باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی نقش مهمی در تعیین صحیح سازوکار رویدادهای اول و دوم در یک لرزه‌نگاشت پیچیده دارد. نتایج این تحقیق برای زمین‌لرزه مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ و زمین‌لرزه اصلی فین ۲۰۰۶/۰۳/۲۵ که به ترتیب در ایران مرکزی و زاگرس رخ داده‌اند، به کار گرفته شد. وارون‌سازی شکل موج زمین‌لرزه فین در بسامدهای بیشتر از ۰/۱ هرتز نشان‌دهنده وجود دو رویداد در چشمه این زمین‌لرزه است. اما، چشمه زمین‌لرزه مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ با یک رویداد دو زوج نیروی خالص تفسیر شد و وجود رویداد دوم در چشمه آن بعید به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: سازوکار زمین‌لرزه، زمین‌لرزه‌های پیچیده، تانسور ممان، زمین‌لرزه فین

Focal mechanisms of moderate earthquakes with complex sources

Babak Hejrani¹, Mohammad Reza Hatami^{1*} and Zaher Hossein Shomali¹

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 30 October 2010, accepted: 28 June 2011, available online: 20 February 2012)

Summary

It is widely believed that the moment tensor (MT) solution of an earthquake with a non-double couple moment tensor gives significant information about the source mechanism. An interesting topic in non-DC source studies is the relationship among non-DC events, multiple DC events, and complexity in fault segmentations.

This study presents a non-DC tectonic earthquake (forward modeling). This means that in the modeled moment tensor, there are no volumetric components. This model was made by adding the seismograms of the two 100% double couple event close lying, thus their seismograms overlap with each other. Then, an investigation is made of the seismic moment of the second subevent, frequency band used in the inversion and also the temporal and spacial separation between two subevents on the result of the inversion. This study focuses on the spacial complex source with $M_w \sim 5$. Based on empirical relations between moment magnitude and ruptured area (Somerville et al, 1999), the fault

*Corresponding author:

mrhatami@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

plane of an earthquake could not be larger than 11 km^2 , which could not be “seen” in our MT analysis (our MT inversion was run at frequency bands between 0.02-0.1 Hz). Thus, this inversion was not a pure DC MT inversion for two subevents at the same point but allowed their time separation to vary. The results show that the mechanism of the second subevent is dependent on the frequency band use and its accuracy is related to the higher frequencies used in the MT inversion (> 0.09). It must be noted that the DC percentage of the moment tensor is dependent on the separation between subevents. The investigation shows that, by increasing the separation between two subevents, the DC percentage reaches higher values, perhaps because of fewer overlaps of the seismograms.

We used the ISOLA package developed by Zahradnik et al, (2005) for the MT inversion, centroid location and time. This package is based on the Kikuchi and Kanamori, (1991) method for the teleseismic study of large earthquakes. ISOLA was developed for local and regional distances. For forward modeling of the complex source, we used the CPS package developed by R.B Herrmann in Saint Louis University.

Finally, we attempt to model the real data. The 2005/05/01 M_w 5 Central Iran earthquake is investigated based on the results of the synthetic test conducted in the first part. A waveform inversion is performed at near-regional stations at frequencies 0.02–0.07 Hz to search for the optimum 3D location and time of the centroid, using broadband station waveforms from the IIEES network. For calculating the Green function, two crustal velocity models were used, namely Ghods et al, (2010) and Walter, (2000). The Ghods et al, (2010) provides a higher correlation between observed and synthetic data. The optimum depth for centroid is 7 km. The stability of the MT inversion was investigated by the jackknifing method, and, finally, those stations which had low correlation between the observed and synthetic data were eliminated. The DC percentage of the moment tensor during the inversion was changed from 7 to 50%, which made this event a candidate for source complexity in order to study whether this earthquake could be interpreted as having two point sources lying close to each other. MT inversions were executed in frequency ranges from 0.02-0.07 to 0.02-0.13 Hz by adding 0.01 in each run. The second subevent had no significant impact on the waveform matches (about 2%). The mechanism of the first subevent was stable during the inversion and made the same correlation as the deviatoric MT inversion, but the mechanism of the second subevent changed considerably as a result of the changes in the frequency band of the inversion. The time separation between two subevents was about 6 to 8 seconds in different runs, which is unacceptable for earthquakes with magnitudes of approximately ~ 5 , for which the fault area is approximately 11 km^2 . Thus, the two point sources model for this earthquake seems not to be a better model than the one point source. We also endeavored to model the M_w 5.7, 2006/03/25 Fin earthquake in southern Iran. The pure DC source model (for frequencies higher than 0.1 Hz) for this earthquake shows two subevents with a 10 km separation from each other.

Key words: Focal mechanism, complex earthquakes, moment tensor, Fin earthquake

۱ مقدمه

مولفه‌های غیر دو زوج نیروی تانسور ممان با پدیده‌های متنوعی نظیر حرکت مایعات، ترک‌های انبساطی (tensile cracks)، ناهمسانگردی و مهم‌تر از همه پیچیدگی هندسه

گسلش، ارتباط دارند (دهم و همکاران، ۱۹۹۹؛ ساراو و همکاران، ۲۰۰۱). نکته مهم در بررسی پیچیدگی چشمه زمین‌لرزه، تفسیر درست مولفه غیر دو زوج نیروی تانسور ممان است (جولین و همکاران، ۱۹۹۸؛ میلر و همکاران،

نیز ۴۲ درصد در فهرست‌نامه CMT هاروارد گزارش شده است. زمین‌لرزه فین با بزرگی گشتاوری ۵/۷ در زاگرس در تاریخ ۲۵/۰۳/۲۰۰۶ در ساعت ۷:۲۹ رخ داده است. در این تحقیق پیچیدگی چشمه این دو زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ داده‌ها و روش کار

در تحقیق حاضر برای وارون‌سازی شکل موج از روش ایزولا استفاده شده است. در این روش حل CMT زمین‌لرزه در مقیاس محلی صورت می‌گیرد. هسته اصلی این روش بر پایه واهمامیخت تکراری (Iterative Deconvolution) کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱) است، که برای تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه در فواصل دورلرزه‌ای به کار رفته است. این روش را زاهرادینیک و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از محاسبه کامل تابع گرین با روش عدد موج گسسته (بوشن، ۱۹۸۱) برای فواصل محلی و منطقه‌ای گسترش داده‌اند. در این روش برای وارون‌سازی خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان از شکل موج کامل داده‌های منطقه‌ای استفاده می‌شود. در ابتدا، تصحیح دستگاهی روی رکوردهای سرعت اعمال می‌شود و با انتخاب فیلتر مناسب، یک باند بسامدی برای مثال در محدوده ۰/۱ تا ۰/۱ هرتز، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس، داده‌های متناظر با سرعت به جابه‌جایی تبدیل می‌شود. با محاسبه توابع گرین لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در ایستگاه‌های گوناگون، محاسبه می‌شود و وارون‌سازی خطی در حوزه زمان صورت می‌گیرد. در روش‌های دورلرزه‌ای مانند حل CMT هاروارد با توجه به صفر شدن توابع گرین متناظر با مولفه‌های $M(۳و۲)$ و $M(۲و۳)$ برای زمین‌لرزه‌های کم‌عمق، دقت این روش‌ها در زمین‌لرزه‌های سطحی (عمق کمتر از ۱۰ کیلومتر) برای تعیین این دو مولفه بسیار کم می‌شود. اما، در روش ایزولا

(۱۹۹۸). مقالات علمی فراوانی وجود دارد که در مورد تفسیر صحیح فیزیکی مولفه غیر دو زوج نیروی تانسور ممان هشدار می‌دهد. در بسیاری از این مقالات تأکید روی قابل‌اعتماد نبودن درصد مولفه دو زوج نیرو به دلیل مسائلی چون سطح نوفه داده‌ها، ناکاملی مدل ساختاری پوسته مورد استفاده و ناهماهنگی داده‌های مشاهده شده و مصنوعی در بعضی از ایستگاه‌ها است (فروهلش، ۱۹۹۴؛ دهم و همکاران، ۱۹۹۹؛ روسله و همکاران، ۲۰۰۷).

کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱)، ۹ رویداد مستقل را برای زمین‌لرزه ۱۹۷۶ گواتمالا ($M_w 7.0$) در راستای گسل با استفاده از داده‌های دورلرزه‌ای تعیین کردند. زاهرادینیک و همکاران (۲۰۰۵) با محاسبه توابع گرین با استفاده از روش عدد موج گسسته بوشن (۱۹۸۱)، روش کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱) را برای فواصل منطقه‌ای و محلی گسترش دادند و برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری ۶/۱ در یونان تا ۴ رویداد را روی سطح گسل تعیین کردند. در این دو تحقیق سازوکارهای به‌دست آمده روی سطح گسل همگی تقریباً روندی امتدادلغز را نشان می‌دهند. زاهرادینیک و همکاران (۲۰۰۸b) چشمه زمین‌لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری پنج را به صورت دو رویداد با سازوکار متفاوت که در یک نقطه رخ داده‌اند، تفسیر کردند. وارون‌سازی تانسور ممان این زمین‌لرزه در حالت انحرافی حل تانسور ممان درصد دو زوج نیروی پایینی را نشان داده است. این تحقیق دارای دو بخش کلی است: اول، مدل‌سازی مصنوعی یک چشمه زمین‌ساختی با درصد دو زوج نیروی پایین و بررسی امکان تفسیر نتایج وارون‌سازی این چشمه به صورت دو رویداد مجزا. دوم، بررسی لرزه‌نگاشت‌های دو زمین‌لرزه واقعی با درصد دو زوج نیروی پایین. زمین‌لرزه اول مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ در ساعت ۵۸:۱۸ در ایران مرکزی اتفاق افتاده است. بزرگی گشتاوری این زمین‌لرزه پنج و درصد دو زوج نیروی آن

لینوکس برای تولید لرزه‌نگاشت‌های چشمه‌های لرزه‌ای متفاوت، نوشته و مورد استفاده قرار گرفته است. در بخش آزمایش‌های مصنوعی داده‌های مشاهده‌ای لرزه‌نگاشت‌های تولید شده با مجموعه CPS هستند. در بخش بررسی زمین‌لرزه واقعی، از داده‌های شکل موج ایستگاه‌های باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) استفاده شده است.

۳ مدل‌سازی مصنوعی یک چشمه پیچیده با بزرگی متوسط

هدف در این بخش مدل‌سازی یک چشمه پیچیده زمین‌ساختی با بزرگی گشتاوری ۵ است (یعنی به هنگام مدل‌سازی و وارون‌سازی تانسور ممان، تغییرات حجمی آن را صفر در نظر می‌گیریم). در این بخش هدف، پاسخ گویی به سؤال‌های زیر است.

اگر دو رویداد با سازوکار متفاوت (مثلاً: امتدادلغز و معکوس) با درصد بالای دو زوج نیروی خالص با فاصله کمی از هم (از لحاظ مکانی و زمانی) قرار بگیرند، تغییرات درصد دوزوج نیرو در حل تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان چگونه خواهد بود؟ تاثیر ممان لرزه‌ای هر رویداد در نتایج وارون‌سازی و تاثیر آن در درصد مولفه دو زوج نیرو در حالت انحرافی حل تانسور ممان چگونه است؟ باند بسامدی مناسب برای دریافت اطلاعات کامل از چشمه زمین‌لرزه چیست؟ تغییر فاصله زمانی و مکانی دو رویداد چه تاثیری در مولفه دو زوج نیروی وارون‌سازی در حالت انحرافی حل تانسور ممان و تعیین سازوکار دو رویداد به هنگام وارون‌سازی در حالت دو زوج نیروی خالص دارد؟

برای بررسی ابعاد یک چشمه با بزرگی گشتاوری ۵، ابتدا روابط تجربی میان ابعاد شکستگی و بزرگی گشتاوری زمین‌لرزه را بررسی می‌کنیم. برای رابطه

می‌توان شش مولفه تانسورگشتاور را به علت استفاده از شکل موج امواج لرزه‌ای در فواصل منطقه‌ای و استفاده از بسامد‌های بیشتر، دقیقاً تعیین کرد.

تعیین چند رویداد در یک زمین‌لرزه با استفاده از شکل موج، به صورت زیر است:

۱. هنگامی که رویداد اول مشخص می‌شود، آن را S_1 می‌نامیم، S_1 را از داده‌های واقعی کم می‌کنیم. اگر داده‌ها (شکل موج‌ها) را با d نمایش دهیم عملیات این مرحله را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$d - S_1 = r \quad (1)$$

که در آن، r معرف شکل موج باقی‌مانده از تفریق لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی رویداد اول از شکل موج مشاهده‌ای است.

۲. در این مرحله r (باقی‌مانده تفریق مرحله قبل) درحکم داده در نظر گرفته می‌شود و همه مراحل صورت گرفته برای رویداد اول مجدداً به کار می‌رود. پس از تعیین رویداد دوم که آن را S_2 می‌نامیم، مجدداً آن را از لرزه‌نگاشت مشاهده‌ای (دقت کنید که این بار لرزه‌نگاشت مشاهده‌ای، r لرزه‌نگاشت باقی‌مانده از مرحله قبل است) کم می‌کنیم و باقی‌مانده را به عنوان لرزه‌نگاشت مشاهده‌ای برای تعیین رویداد سوم به مرحله بعد می‌بریم. با تکرار مراحل فوق می‌توان هر تعداد رویداد را با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های یک زمین‌لرزه تعیین کرد.

در تحقیق حاضر این روش برای بررسی لرزه‌نگاشت‌های آزمایش‌های مصنوعی و واقعی به کار گرفته شده است برای تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی از مجموعه نرم افزاری CPS که توسط پروفیسور هرمن در دانشگاه سنت لویز آمریکا تهیه شده و به صورت رایگان در تارنمای شخصی ایشان قرار دارد، استفاده شده است. بدین منظور اسکریپت‌های سی شل مناسب در محیط

مکانی نه کیلومتری دو رویداد و تاخیر زمانی سه ثانیه‌ای دو رویداد از یکدیگر به هنگام جمع آنها. در این مدل‌سازی‌ها فرض بر این بوده که سرعت گسیختگی سه کیلومتر بر ثانیه است. در این مرحله نیز به هنگام وارون‌سازی (با توجه به باند بسامدی مورد استفاده) همچنان مکان دو رویداد ثابت در نظر گرفته می‌شود.

رویداد اول با سازوکار یک گسل معکوس با امتداد یک، شیب ۴۵، ریک ۸۹ درجه و رویداد دوم با سازوکار یک گسل امتدادلغز با امتداد ۴۵، شیب ۸۹ و ریک یک درجه تولید شده است. درصد دو زوج نیروی هر دو رویداد ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

۴ تاثیر باند بسامدی

در این بخش تاثیر باند بسامدی را در وارون‌سازی شکل موج بررسی خواهیم کرد. حد پایین این باند بسامدی را مطابق با حد پایین معمول در لرزه‌نگاشت‌های باند پهن در نظر می‌گیریم (۰/۰۱ - ۰/۰۲ هرتز) و حد بالایی آن را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. ممان رویداد اول را 10^{24} نیوتن متر و رویداد دوم را 10^{33} ۴ نیوتن متر انتخاب کرده‌ایم. یعنی ممان رویداد اول تقریباً دو برابر رویداد دوم است. در ابتدا باند بسامدی را $0.02 - 0.06$ هرتز فرض کرده و هر بار 0.005 هرتز به حد بالایی باند بسامدی می‌افزاییم، سپس تا $0.02 - 0.12$ هرتز ادامه می‌دهیم. نتایج وارون‌سازی را برای اولین و آخرین باند بسامدی به دست می‌آوریم. ابتدا تاثیر باند بسامدی را روی درصد مولفه غیر دو زوج نیرو در حالت انحرافی حل تانسور ممان بررسی می‌کنیم. سپس دقت در تعیین سازوکار (زوایای شیب، امتداد و ریک سازوکارهای معکوس و امتدادلغز) و ممان رویدادهای اول و دوم برای وارون‌سازی تانسور ممان در حالت دو زوج نیروی خالص تانسور ممان را، بررسی می‌کنیم. نحوه قرارگیری ایستگاه‌ها، چشمه زمین‌لرزه (در عمق پنج کیلومتری) و

مساحت صفحه گسل با بزرگی زمین‌لرزه، به صورت تقریبی، داریم (سامرویل و همکاران، ۱۹۹۹):

$$M_w = \log A + 3.95 \quad (2)$$

که در آن، A (برحسب کیلومتر مربع km^2) است) مساحت سطح گسیختگی و M_w ، بزرگی گشتاوری زمین‌لرزه است. در این صورت برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی گشتاوری ۵، مساحت شکستگی تقریباً برابر با ۱۱ کیلومتر مربع خواهد بود. پس در چنین مساحتی بزرگ‌ترین فاصله بین دو رویداد برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری ۵ نیز کمتر از ۱۱ کیلومتر است.

در وارون‌سازی تانسور ممان در مقیاس محلی به‌طور معمول از بسامدهای کمتر از 0.1 هرتز استفاده می‌شود. برای بسامدهای کمتر از 0.1 هرتز (یا دوره بیش از ۱۰ ثانیه) فواصل کمتر از ۱۱ کیلومتر قابل تشخیص نیست (با فرض اینکه سرعت گسیختگی را به طور متوسط ۳ کیلومتر بر ثانیه در نظر بگیریم، فاصله ۱۱ کیلومتری، فاصله زمانی $3/7$ ثانیه را مشخص می‌کند که در دوره امواج بزرگ‌تر از ۱۰ ثانیه دیده نمی‌شود). در ابتدا دو رویداد با سازوکار متفاوت (امتدادلغز و معکوس) را در یک نقطه تولید می‌کنیم و لرزه‌نگاشت‌های آنها را بدون تاخیر زمانی با هم جمع می‌کنیم. در این حالت لرزه‌نگاشت‌ها بیشترین هم‌پوشانی را با هم خواهند داشت (چون با کمترین فاصله زمانی ممکن با هم جمع می‌شوند). سپس سعی می‌کنیم تا تاثیرات باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی و مقادیر ممان لرزه‌ای هر رویداد را در تعیین صحیح سازوکار رویدادهای اول (معکوس) و دوم (امتدادلغز) بررسی کنیم.

در مرحله نهایی دو آزمایش دیگر برای بررسی تاثیر فاصله زمانی و مکانی دو رویداد صورت گرفته است. اول، فاصله مکانی سه کیلومتری دو رویداد به هنگام تولید لرزه‌نگاشت‌ها و تاخیر زمانی یک ثانیه‌ای، دوم، فاصله

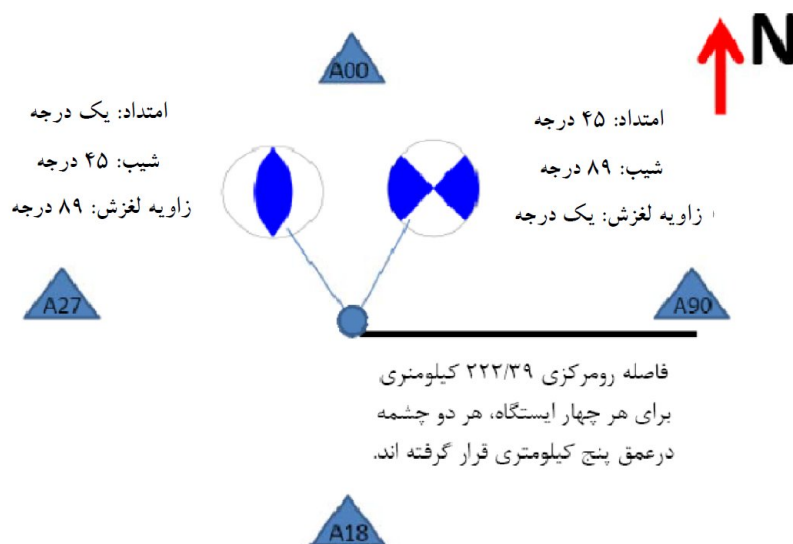
نیروی خالص تانسور ممان برای رویداد اول و دوم در شکل ۲ آورده شده است.

دقت کنید که در همه آزمایش‌ها به داده‌های مشاهده‌ای هیچ‌گونه نوفه‌ای اضافه نشده است. نتایج وارون‌سازی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان (شکل ۲-ب) درصد مولفه دو زوج نیرو را $22/2\%$ و درصد مولفه غیر دو زوج نیروی تانسور ممان را $77/8\%$ نشان می‌دهد. کاهش واریانس در این حالت 90% گزارش شده است.

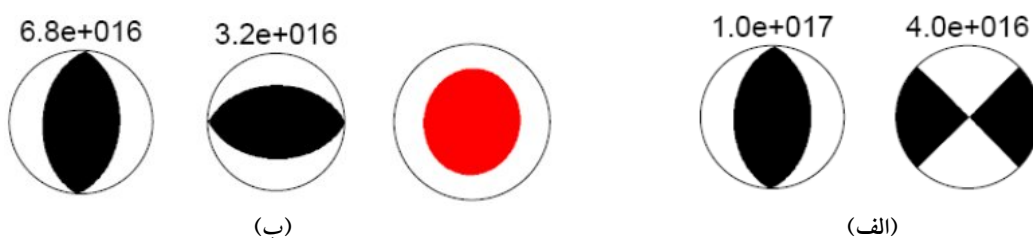
فاصله ایستگاه‌ها تا چشمه زمین‌لرزه در شکل ۱ نشان داده شده است. نام‌گذاری ایستگاه‌ها با توجه به آزیموتشان نسبت به چشمه صورت گرفته است (مثلاً A90 برای ایستگاهی که آزیموتش نسبت به زمین‌لرزه 90° درجه است).

۱. باندهای بسامدی $0/02 - 0/06$ هرتز

باندهای بسامدی وارون‌سازی را $0/02 - 0/06$ هرتز در نظر می‌گیریم. نتایج وارون‌سازی در حالت انحرافی حل تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای و حالت دو زوج



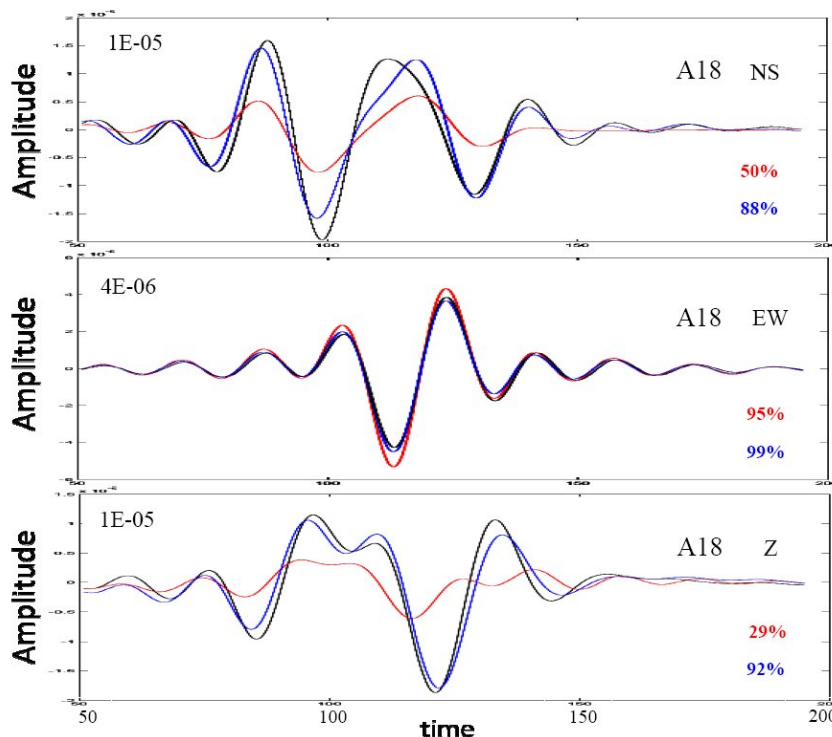
شکل ۱. شرایط ایستگاه‌ها و موقعیت چشمه زمین‌لرزه‌ها در شکل نشان داده شده است. دو رویداد در یک نقطه در عمق ۵ کیلومتری تولید شده اند و لرزه نگاشته‌های آنها بدون تاخیر زمانی با هم جمع شده است. ایستگاه‌ها در فاصله $222/39$ کیلومتر (دو درجه) و در آزیموت‌های به ترتیب صفر (A00)، 90° (A90)، 180° (A18) و 270° (A27) درجه ای قرار گرفته اند.



شکل ۲. (الف) دو چشمه دو زوج نیرو که در یک نقطه تولید شده‌اند. روی هر سازوکار ممان آن به نیوتن‌متر نوشته شده است و (ب) نتایج وارون‌سازی برای رویداد اول و رویداد دوم (دو زوج نیروی خالص) به رنگ مشکی نشان داده شده است. در ستون آخر حل تانسور ممان در حالت انحرافی تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای نشان داده شده است. باندهای بسامدی مورد استفاده $0/02$ تا $0/06$ انتخاب شده است.

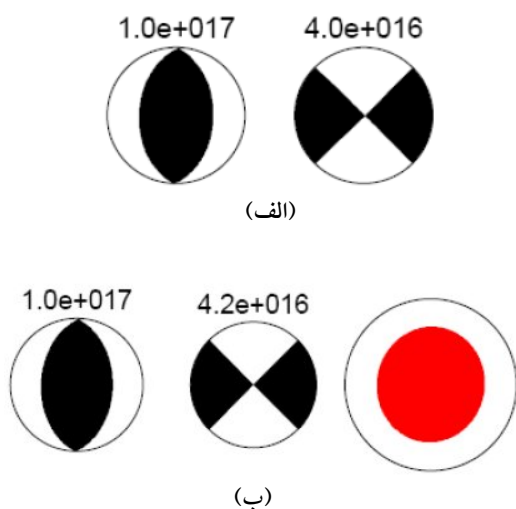
CMT در زمین‌لرزه‌های واقعی، در صورت مشاهده درصد بالای دو زوج نیرو باید زمین‌لرزه را مناسب چشمه پیچیده دانست (مانند این آزمایش که در باند بسامدی $0.02 - 0.06$ هرتز صورت گرفته است). اما برای تعیین پیچیدگی احتمالی چشمه و یا تفسیر مولفه‌های غیر دو زوج نیروی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان، استفاده از همان باند بسامدی ($0.02 - 0.06$ هرتز) منطقی به نظر نمی‌رسد. در حقیقت همان‌طور که در این آزمایش دیدیم، گرچه رویداد دوم همبستگی لرزه‌نگاشت‌های واقعی و مصنوعی را بهینه می‌کند، اما مشخصات آن اشتباه تعیین می‌شود (یعنی چیزی به جز سازوکار امتدادلغز با امتداد 45° ، شیب 89° و ریک یک درجه تولید شده است). در آزمایش‌های بعدی نتایج استفاده از بسامدهای بیشتر برای تعیین درست سازوکار رویدادهای اول و دوم آورده می‌شود.

با عمل وارون‌سازی برای رویداد دوم، اگر چه کاهش واریانس برای رویداد اول 70% درصد و پس از رویداد دوم به 87% درصد می‌رسد، اما مشاهده می‌شود که سازوکار آن کاملاً اشتباه است (به سازوکار معکوس برای رویداد دوم در شکل ۲-ب نگاه کنید)، که نشان می‌دهد از باندهای بسامدی پایین (امواج دوره بلند)، نمی‌توان همه جزئیات چشمه را با دقت تعیین کرد. در شکل ۳ برای ایستگاه A18 شکل موج مشاهده‌ای، شکل موج رویداد اول، و شکل موج رویداد اول و دوم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ می‌توان دید لرزه‌نگاشت رویداد دوم، تاثیر بسیار زیادی در بهینه‌سازی همبستگی میان لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی دارد. اما این تاثیر زیاد را نباید به‌منزله حل درست سازوکار رویداد دوم در نظر گرفت (این موارد می‌تواند محقق را به اشتباه بیندازد). به هنگام وارون‌سازی تانسور ممان و یا حل



شکل ۳. شکل موج مشاهده‌ای (مشگی)، شکل موج ناشی از زمین‌لرزه اول (سرخ) و شکل موج ناشی از زمین‌لرزه اول و دوم (آبی) و درصد کاهش واریانس برای زمین‌لرزه اول (سرخ) و زمین‌لرزه اول و دوم (آبی) نشان داده شده است باند بسامدی در وارون‌سازی 0.02 تا 0.06 انتخاب شده است.

انحرافی تانسور ممان، رسم شده است. درصد دو زوج نیروی تانسور ممان در این حالت بین ۱۵ تا ۲۲ درصد تغییر می‌کند و با افزایش باند بسامدی، درصد دو زوج نیروی تانسور ممان کاهش می‌یابد. در شکل ۶-ب، نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی، در حالت دو زوج نیروی خالص تانسور ممان برای رویداد اول رسم شده است. مشاهده می‌شود که پایداری خوبی در حل سازوکار رویداد اول دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل تاثیر بیشتر زمین‌لرزه اول در شکل موج‌ها باشد (البته در باندهای بسامدی ۰/۱۱۵-۰/۰۲ هرتز و ۰/۱۱-۰/۰۲ هرتز سازوکار اشتباه دیده می‌شود که بررسی بیشتر آنها در ادامه آورده می‌شود). اما همان‌طور که در شکل ۶-ب، دیده می‌شود حل سازوکار رویداد دوم فقط برای بسامدهای ۰/۱۰۵، ۰/۱۲، ۰/۰۷ و ۰/۰۷۵ هرتز صحیح است.

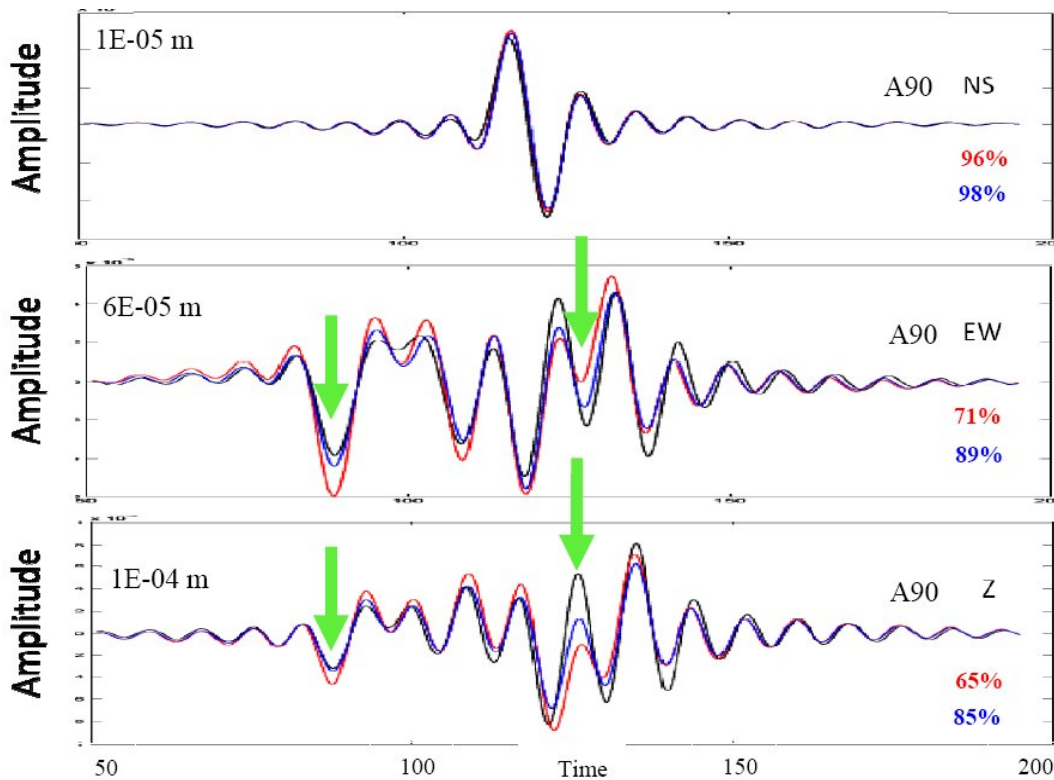


شکل ۴. (الف) دو چشمه دو زوج نیرو که در یک نقطه تولید شده‌اند. روی هر سازوکار ممان آن به نیوتن‌متر نوشته شده است و (ب) نتایج وارون‌سازی برای رویداد اول و رویداد دوم (دو زوج نیروی خالص) به رنگ مشکی نشان داده شده است. در ستون آخر حل تانسور ممان در حالت انحرافی تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای نشان داده شده است. باند بسامدی مورد استفاده ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ انتخاب شده است.

۲. باند بسامدی ۰/۰۲-۰/۱۲ هرتز اکنون باند بسامدی را به ۰/۰۲-۰/۱۲ هرتز افزایش می‌دهیم. نتایج این آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. وارون‌سازی در حالت انحرافی حل تانسور ممان همچنان درصد دو زوج نیروی بالایی را نشان می‌دهد (شکل ۴-ب سازوکار سرخ‌رنگ). همان‌طور که در شکل ۴-ب دیده می‌شود سازوکار زمین‌لرزه دوم با دقت زیادی، درست تعیین شده است (سازوکار امتدادلغز). با مقایسه نتایج حالت اول (باند بسامدی ۰/۰۲-۰/۰۶ هرتز، شکل ۲-ب) و دوم (باند بسامدی ۰/۰۲-۰/۱۲ هرتز، شکل ۴-ب) می‌توان نتیجه گرفت که باند بسامدی پهن‌تر (باند بسامدی که شامل بسامدهای بیشتر نیز باشد) در تعیین صحیح پیچیدگی‌های زمین‌لرزه توانا تر است.

شکل موج ایستگاه A90 در شکل ۵ نشان داده شده است. در مورد مولفه EW و Z رویداد دوم در بعضی موارد برای نزدیک شدن به شکل موج مشاهده‌ای باعث کاهش دامنه و در بعضی باعث افزایش دامنه می‌شود (در شکل ۵ با فلش سبز رنگ دیده می‌شود). در جاهایی که شکل موج رویداد اول (سرخ) دامنه‌ای بیش از شکل موج رویداد اول و دوم (آبی) دارد (حتی بیش از شکل موج مشاهده‌ای به رنگ مشکی)، مربوط به جایی است که حاصل جمع شکل موج‌ها (مشکی)، باعث کاهش دامنه آنها می‌شود. در جاهایی که حاصل جمع شکل موج‌ها، باعث افزایش دامنه شود، دامنه رویداد اول کمتر از رویداد اول و دوم با هم است.

اکنون نتایج وارون‌سازی در باندهای بسامدی ۰/۰۲-۰/۰۶ هرتز تا ۰/۰۲-۰/۱۲ هرتز (با افزایش ۰/۰۰۵ هرتز در هر مرحله) را برحسب درصد مولفه غیر دو زوج نیرو و همچنین برحسب مقدار کاهش واریانس بررسی می‌کنیم. در شکل ۶-الف، نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی تانسور ممان در حالت



شکل ۵. شکل موج مشاهده‌ای (مشگی)، شکل موج ناشی از رویداد اول (سرخ) و شکل موج ناشی از رویداد اول و دوم (آبی) و درصد کاهش واریانس برای رویداد اول (سرخ) و رویداد اول و دوم (آبی) برای ایستگاه A90 نشان داده شده است. پیکان‌های سبزرنگ نشان دهنده مکان‌هایی است که شکل موج‌های اول و دوم باعث افزایش و یا کاهش دامنه شکل موج مصنوعی برای همبستگی با شکل موج مشاهده‌ای (مشگی رنگ) شده است.

۵ بررسی تاثیر ممان لرزه‌ای در وارون‌سازی چشمه

پیچیده

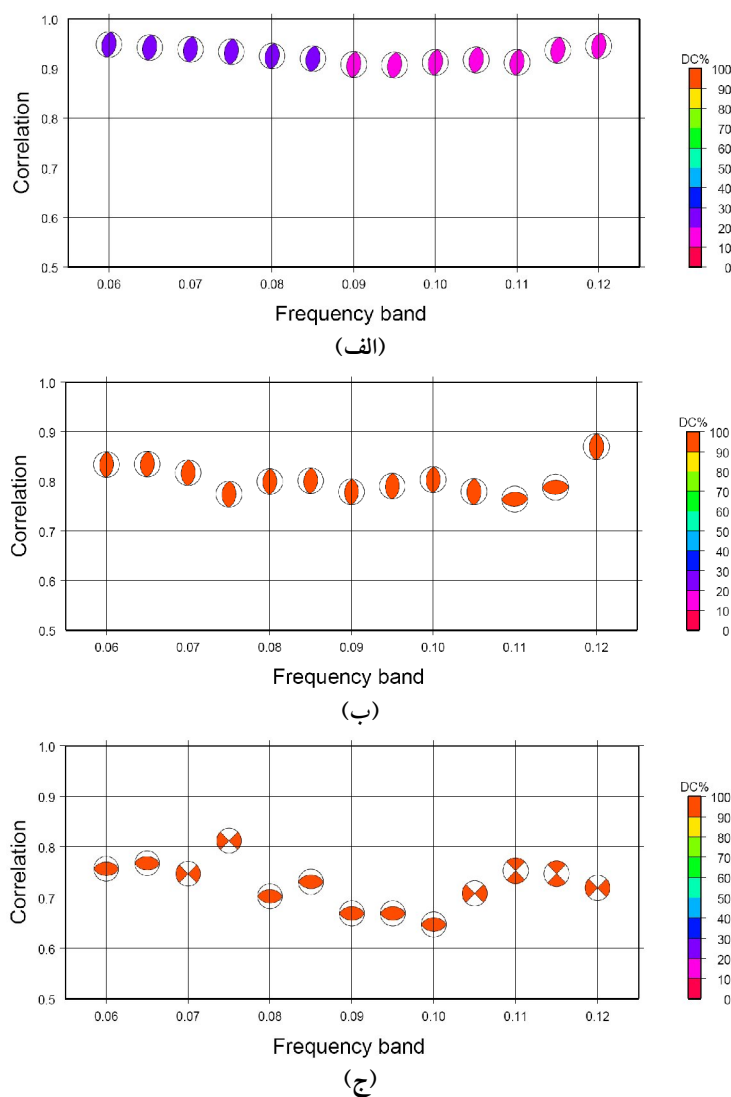
در این بخش آزمایش‌های فصل قبل را با تغییر در ممان لرزه‌ای رویداد دوم تکرار می‌کنیم. باند بسامدی برای وارون‌سازی را در همه آزمایش‌ها ۰/۱۲-۰/۰۲ هرتز در نظر می‌گیریم (در فصل قبل نتایج وارون‌سازی در باندهای بسامدی متفاوت بررسی شد). شرایط آزمایش‌ها، موقعیت ایستگاه‌ها و عمق زمین‌لرزه به مانند شکل ۱ است. هدف جست‌وجوی پاسخی به سؤال‌های زیر است: آیا با افزایش ممان لرزه‌ای زمین‌لرزه دوم، تاثیر آن در وارون‌سازی نیز بیشتر می‌شود؟ این افزایش چه تاثیری در تغییرات مولفه دو زوج نیرو در حل حالت انحرافی تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای دارد؟

۱. فرض کنیم ممان لرزه‌ای رویداد اول 10^{17} نیوتن‌متر و رویداد دوم 10^{16} نیوتن‌متر باشد (ممان رویداد اول ۱۰ برابر رویداد دوم است).

در شکل ۷-ب نتیجه وارون‌سازی برای یک چشمه نقطه‌ای، در حالت انحرافی تانسور ممان و دو رویداد در حالت دو زوج نیروی خالص در باند بسامدی ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ هرتز نشان داده شده است. در این حالت ۴۰ درصد تانسور ممان را مولفه‌های غیر دو زوج نیرو تشکیل می‌دهد. میزان کاهش واریانس برای رویداد اول ۸۴٪ و برای رویداد دوم ۸۷٪ است. نتایج وارون‌سازی برای رویداد دوم فقط سه درصد افزایش را در بهینه‌سازی همبستگی شکل موج مشاهده‌ای و مصنوعی نشان می‌دهد. اما، همین افزایش سه درصدی توانسته است سازوکار

تعیین می‌شود. به همین دلیل هنگام وارون‌سازی، رویداد اول به تنهایی، کاهش واریانس لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی را به ۸۴٪ می‌رساند و رویداد دوم تنها تاثیری سه درصدی در افزایش کاهش واریانس دارد. ۲. ممان رویداد اول 10^{17} نیوتن متر و رویداد دوم 10^{16} نیوتن متر باشد.

(کاملاً درست) و تا حدودی ممان زمین‌لرزه دوم را درست تعیین کند. دلیل این امر را باید در انتخاب باند بسامدی پهن و استفاده از بسامدهای بالاتر در وارون‌سازی دانست. براساس نظریه روش کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱)، هنگام وارون‌سازی، بهترین برازش میان لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی به‌منزله رویداد اول



شکل ۶. نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی و درصد دو زوج نیروی تانسور ممان، (الف) در حالت انحرافی حل تانسور ممان، (ب) رویداد دو زوج نیروی اول و (ج) رویداد دو زوج نیروی دوم. درصد دو زوج نیروی تانسور ممان با مقیاس رنگی نشان داده شده است. روی محور افقی فقط حد بالایی باند بسامدی نمایش داده شده است و حد پایین همه باندهای بسامدی $0/02$ هرتز در نظر گرفته شده است. یعنی مثلاً باند بسامدی $(0/06 - 0/02)$ هرتز، با $0/06$ هرتز روی محور افقی نشان داده شده است. وارون‌سازی در حالت انحرافی تانسور ممان: تغییرات درصد دو زوج نیرو در این حالت از ۲۲ درصد (رنگ آبی) تا ۱۵ درصد (بنفش) دیده می‌شود.

۶ بررسی فاصله زمانی و مکانی دو رویداد در نتایج

وارون‌سازی

در این بخش تاثیر فاصله زمانی و مکانی دو رویداد را در نتایج وارون‌سازی مورد بررسی قرار می‌دهیم. در دو بخش قبل لرزه‌نگاشت‌های هر دو رویداد مورد نظر در یک نقطه تولید و بدون تاخیر زمانی با هم جمع شد. این وضعیت مسلماً جنبه واقعیت فیزیکی ندارد و صرفاً برای بررسی بیشترین هم پوشانی ممکن میان لرزه‌نگاشت‌های رویدادهای اول و دوم و تاثیر آن روی درصد دو زوج نیروی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان صورت گرفت. همان‌طور که در دو بخش قبل دیده شد با افزایش باند بسامدی، می‌توان اطلاعات بیشتری از چشمه زمین‌لرزه دریافت کرد. اما همچنان در باندهای بسامدی بالاتر در حل سازوکار دو رویداد شاهد ناپایداری‌هایی بودیم. در این بخش دو آزمایش دیگر را به انجام می‌رسانیم. در آزمایش اول فاصله مکانی دو رویداد را ۳ کیلومتر (عمق هر دو رویداد پنج کیلومتر در نظر گرفته شده است)، فاصله زمانی آنها را یک ثانیه، ممان رویداد اول 10^{17} نیوتن‌متر و ممان رویداد دوم را 10^{16} نیوتن‌متر در نظر می‌گیریم و نتایج وارون‌سازی را برای باندهای بسامدی $0/02-0/06$ تا $0/02-0/12$ هرتز با افزایش $0/005$ هرتز در هر بار نشان می‌دهیم. در این مرحله نیز مکان زمین‌لرزه را به هنگام وارون‌سازی ثابت در نظر می‌گیریم. نتایج این آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. در آزمایش دوم، فاصله مکانی دو رویداد ۹ کیلومتر (عمق هر دو رویداد پنج کیلومتر در نظر گرفته شده است) و فاصله زمانی آنها ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است. مراحل قبلی تکرار شده و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در همه این آزمایش‌ها برای وارون‌سازی، مکان دو رویداد ثابت است، اما تغییرات زمانی آنها مورد بررسی

نتایج وارون‌سازی در حالت انحرافی تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای و تانسور دو زوج نیروی خالص برای دو رویداد در شکل ۸-ب، نشان داده شده است. در این حالت مولفه غیر دو زوج نیرو 55% است. با وارون‌سازی در حالت دو زوج نیرو خالص، رویداد اول کاهش واریانس لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی را به 81% می‌رساند و رویداد دوم تاثیری 6% درصدی در افزایش کاهش واریانس به 87% دارد. وارون‌سازی مانند حالت قبل در باند بسامد $0/02$ تا $0/12$ هرتز صورت گرفته است.

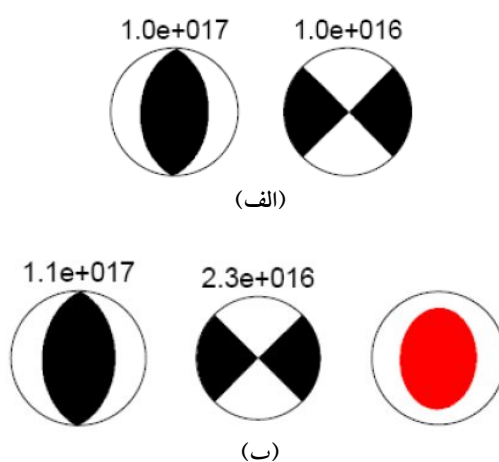
۳. ممان رویداد اول 10^{17} نیوتن‌متر و رویداد دوم 10^{16} نیوتن‌متر باشد.

نتیجه وارون‌سازی در حالت انحرافی تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای در این حالت، درصد مولفه دو زوج نیرو را $15/5\%$ و درصد مولفه غیر دو زوج نیروی تانسور ممان را $84/5\%$ نشان می‌دهد. کاهش واریانس برای زمین‌لرزه اول 76% و برای زمین‌لرزه دوم به 88% می‌رسد، (افزایش 12% درصدی) یعنی چهار برابر حالتی که ممان رویداد اول 10 برابر ممان رویداد دوم بود. وارون‌سازی مانند حالات قبل در باند بسامد $0/02$ تا $0/12$ هرتز صورت گرفته است. نتایج حل تانسور ممان در حالت دو زوج نیروی خالص برای رویداد اول و دومین رویداد نیز در شکل ۴-ب نشان داده شده است.

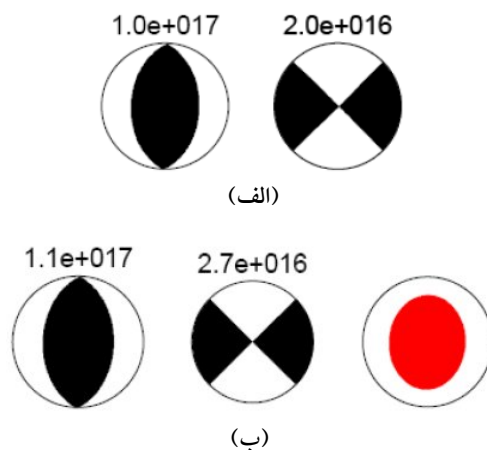
نتایج وارون‌سازی در حالت دو زوج نیروی خالص برای رویداد اول و دوم مقادیر تولیدی در مدل‌سازی پیش‌رو را نشان می‌دهد (ممان، امتداد، شیب و زاویه لغزش). افزایش ممان لرزه‌ای زمین‌لرزه دوم باعث افزایش درصد مولفه غیر دو زوج نیروی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان و باعث افزایش سهم در مقدار کاهش واریانس برای تعیین رویداد دوم در وارون‌سازی تانسور ممان در حالت دو زوج نیروی خالص می‌شود.

معکوس) که دارای انتقال (شیفت)های زمانی متفاوتی هستند. در شکل ۱۰-ج، بسامدهای ۰/۱ هرتز و بالاتر جواب سازوکار دوم (امتدادلغز) به درستی تعیین شده است و بسامدهای بالاتر از ۰/۰۸۵ تا ۰/۱ هرتز نیز دارای دو جواب با انتقالهای زمانی متفاوت هستند (روی هر سازوکار انتقال زمانی آن را می‌توان دید).

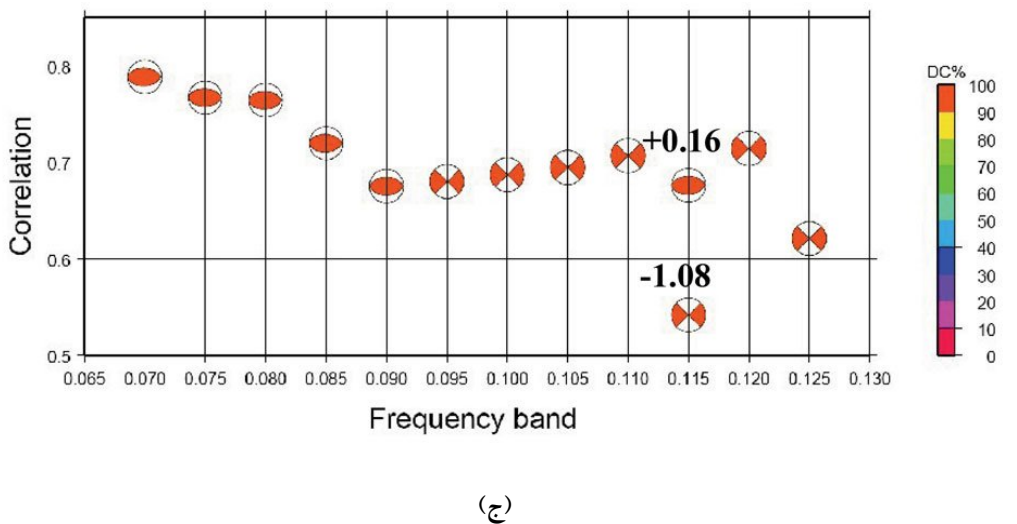
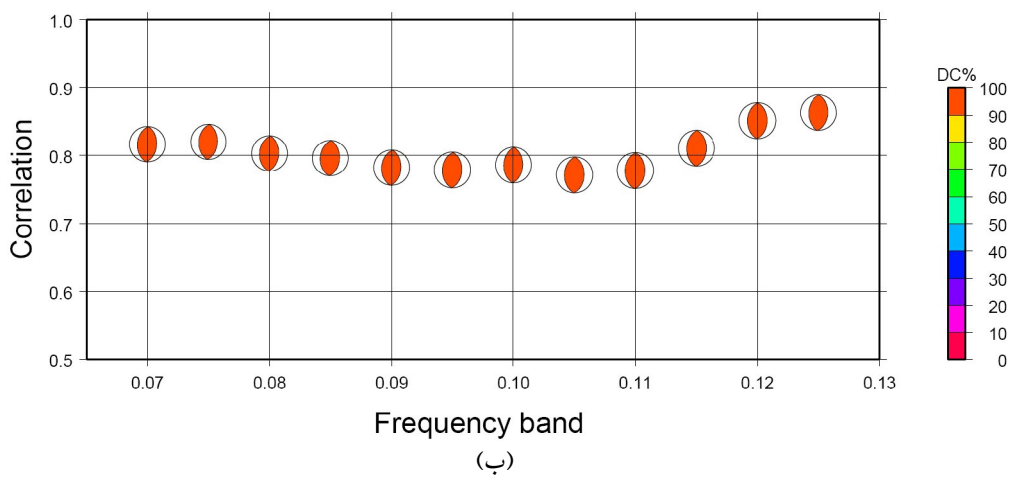
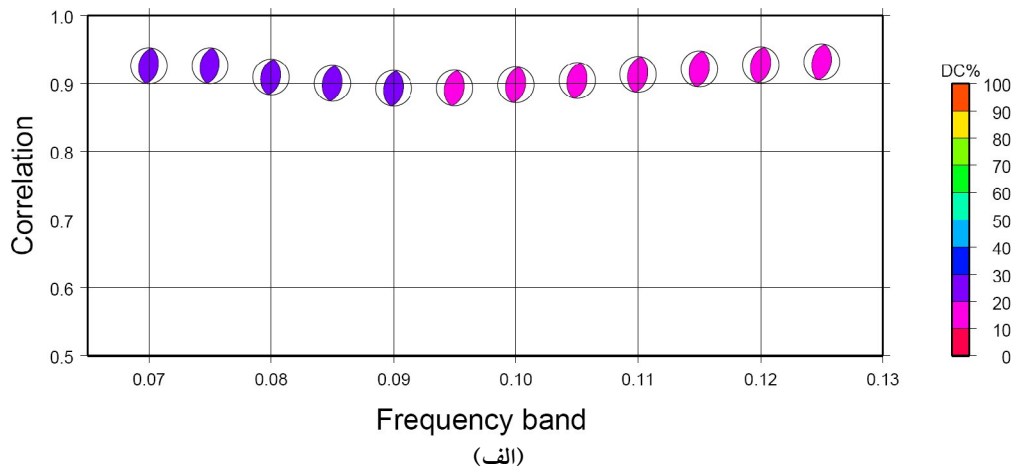
قرار می‌گیرد. برخلاف شکل ۶-ب در شکل‌های ۹-ب و ۱۰-ب، حل سازوکار رویداد اول کاملاً درست صورت گرفته است. همچنین برای بسامدهای بالاتر از ۰/۰۹۵ هرتز در شکل ۹-ج، سازوکار رویداد دوم (امتدادلغز) نیز درست تعیین شده است. در باند بسامدی ۰/۱۱۵ هرتز برای سازوکار دوم شاهد دو جواب هستیم (امتدادلغز و



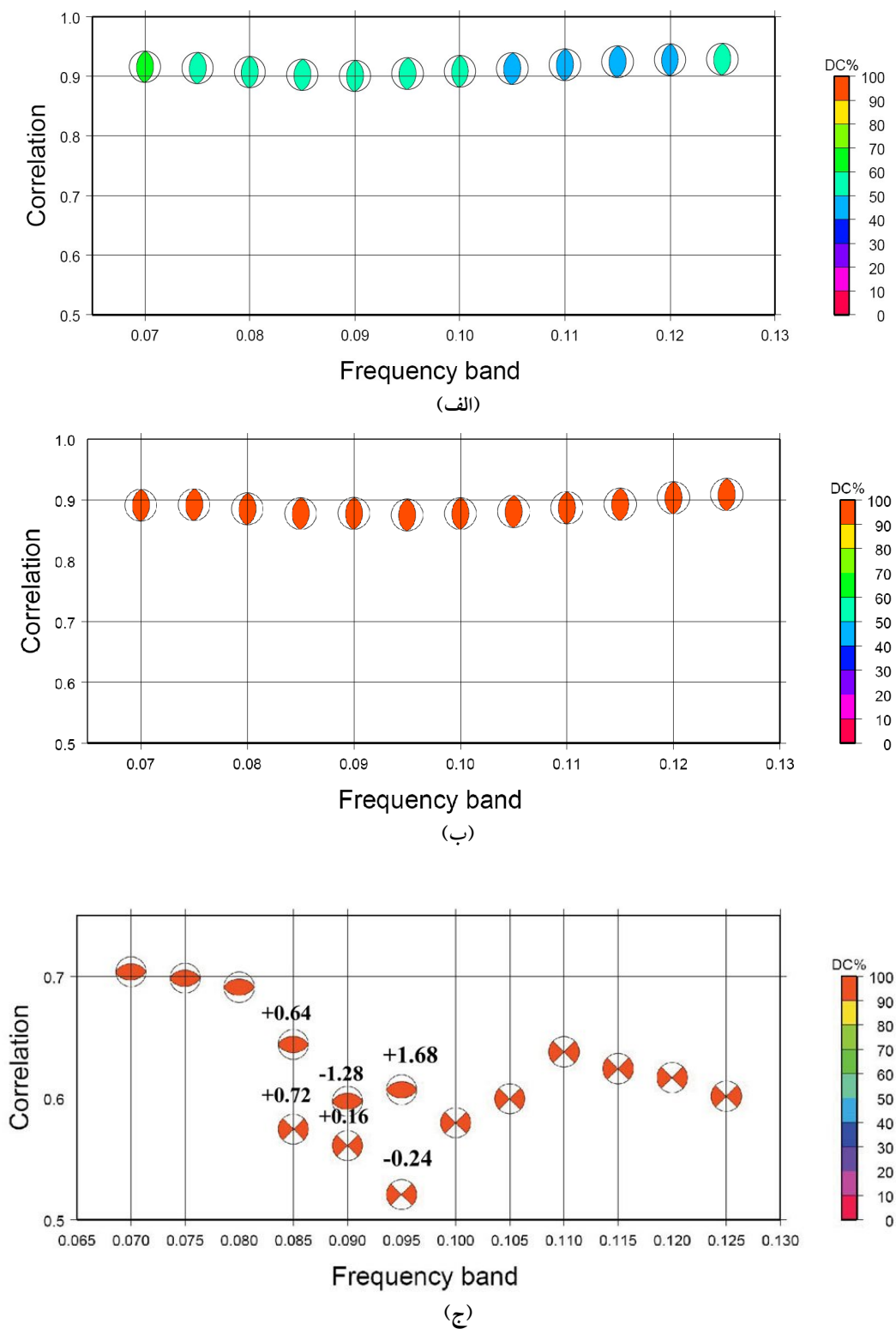
شکل ۷. (الف) دو چشمه دو زوج نیرو که در یک نقطه تولید شده‌اند. روی هر سازوکار ممان آن به نیوتن-متر نوشته شده است و (ب) نتایج وارون‌سازی برای رویداد اول و رویداد دوم (دو زوج نیروی خالص) به رنگ مشکی نشان داده شده است. در ستون آخر حل تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای نشان داده شده است. باند بسامدی مورد استفاده ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ انتخاب شده است.



شکل ۸. (الف) دو چشمه دو زوج نیرو که در یک نقطه تولید شده‌اند. روی هر سازوکار ممان آن به نیوتن-متر نوشته شده است و (ب) نتایج وارون‌سازی برای رویداد اول و رویداد دوم (دو زوج نیروی خالص) به رنگ مشکی نشان داده شده است. در ستون آخر حل تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان برای یک چشمه نقطه‌ای نشان داده شده است. باند بسامدی مورد استفاده ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ انتخاب شده است.



شکل ۹. نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی تانسور ممان. (الف) در حالت انحرافی حل تانسور ممان، (ب) رویداد دو زوج نیروی اول و (ج) رویداد دو زوج نیروی دوم برای حالتی که فاصله دو چشمه سه کیلومتر است، رسم شده است. شرایط شکل‌ها مانند شکل شش است. برای وارون‌سازی در باند بسامدی $0.02 - 0.115$ دو جواب با انتقال زمانی متفاوت دیده می‌شود. روی این دو جواب انتقال زمانی آنها نیز نوشته می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی تانسور ممان. (الف) در حالت انحرافی حل تانسور ممان، (ب) رویداد دو زوج نیروی اول و (ج) رویداد دو زوج نیروی دوم برای حالتی که فاصله دو چشمه نه کیلومتر است، رسم شده است. شرایط شکل‌ها مانند شکل شش است. برای وارون‌سازی در سه باند بسامدی دو جواب با انتقال زمانی متفاوت دیده می‌شود. روی جواب‌ها انتقال زمانی آنها نیز نوشته می‌شود.

دو زوج نیرو در همان باند بسامدی، ۶۰ درصد است. با افزایش ممان لرزه‌ای رویداد دوم، به دلیل بیشتر شدن تاثیر لرزه‌نگاشت‌های آن در وارون‌سازی، درصد دو زوج نیروی تانسور ممان کاهش می‌یابد.

۳. درصد دو زوج نیروی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان با افزایش فاصله میان دو رویداد افزایش می‌یابد. چرا که افزایش فاصله دو رویداد باعث کم شدن هم‌پوشانی لرزه‌نگاشت‌های دو رویداد می‌شود. به هنگامی که هر دو رویداد در یک نقطه قرار دارند (ممان اولی ۲/۵ برابر دومی باشد) درصد دو زوج نیروی تانسور ممان از ۱۵ تا ۲۲ درصد تغییر می‌کند. اما با همین شرایط هنگامی که فاصله دو رویداد نه کیلومتر قرار داده شد، درصد دو زوج نیرو از ۴۷ تا ۶۰ درصد تغییر کرد. هرچه فاصله زمانی و مکانی دو رویداد بیشتر شود، تشخیص سازوکار رویدادهای اول و دوم پایداری بیشتری را نشان می‌دهد.

۷ بررسی زمین‌لرزه ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ در ایران مرکزی زمین‌لرزه مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ در ساعت ۵:۱۸ در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی با بزرگی گشتاوری ۵ اتفاق افتاده است. گزارش CMT هاروارد برای این زمین‌لرزه درصد مولفه دو زوج نیرو را ۴۲ درصد نشان می‌دهد. برای تعیین مکان مرکزوار و عضوهای تانسور ممان در مقیاس محلی از روش ایزولا استفاده شد. وارون‌سازی برای تعیین این مکان بهینه در باند بسامدی ۰/۲-۰/۷ هرترت صورت گرفته است. از داده‌های شکل موج ۶ ایستگاه باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای وارون‌سازی چشمه زمین‌لرزه استفاده شد. توزیع ایستگاه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. از مدل پوسته قدس و همکاران (۲۰۱۰)، برای محاسبه توابع گرین استفاده شد. آزمایش‌ها زیادی با حذف یک‌یک ایستگاه‌ها و

همان‌طور که دیده می‌شود با بیشتر شدن فاصله مکانی و زمانی دو رویداد، سازوکار زمین‌لرزه دوم (امتدادلغز) در بسامدهای پایین‌تر (در شکل ۱۰-ج، از ۰/۰۸۵ هرترت به بالا) نیز قابل تشخیص است. همان‌طور که گفته شد قرار دادن هر دو رویداد در یک نقطه، بدون انتقال زمانی (شکل ۶-ب) چندان جنبه واقعیت فیزیکی ندارد (عملاً غیر ممکن است). اما محک خوبی برای دیدن دامنه تغییرات مولفه غیر دو زوج نیرو برحسب فاصله دو رویداد، در حل حالت انحرافی تانسور ممان است.

۶ بحث درخصوص نتایج حاصل از مدل‌سازی مصنوعی

نتیجه این آزمایش‌ها را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱. مهم‌ترین نتیجه‌ای که می‌توان گرفت اینکه بهتر است در مواجهه با زمین‌لرزه‌های واقعی، که در وارون‌سازی حالت انحرافی تانسور ممان درصد بالای غیر دو زوج نیرو را نشان می‌دهند، از باندهای بسامدی پهن، و تا جایی که مدل ساختار سرعتی پوسته اجازه می‌دهد، بالا، برای تفسیر این زمین‌لرزه‌ها به صورت چند رویداد دو زوج نیروی خالص با سازوکارهای متفاوت، استفاده کرد. تعیین تانسور ممان با استفاده از بسامدهای بالاتر، اطلاعات بیشتری را به چشمه زمین‌لرزه را در وارون‌سازی دخالت می‌دهد و بنابراین نتایج قابل اعتماد تری را ارائه می‌دهد.

۲. درصد دو زوج نیروی تانسور ممان در حالت انحرافی حل تانسور ممان با افزایش ممان لرزه‌ای رویداد دوم کاهش می‌یابد. با افزایش ممان لرزه‌ای رویداد دوم به ۰/۴ ممان رویداد اول، درصد دو زوج نیرو در باند بسامدی ۰/۲-۰/۱۲ هرترت به ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. اما هنگامی که ممان رویداد دوم ۰/۱ رویداد اول باشد درصد

حل تانسور ممان برای این زمین لرزه غیر واقعی باشد (یعنی ناشی از پیچیدگی در چشمه زمین لرزه نیست). چرا که حل تانسور ممان در حالت دو زوج نیروی خالص همان نتیجه (سازوکار و مقدار همبستگی) تانسور انحرافی را با درصد دو زوج نیروی ۱۰۰ نشان می‌دهد. (شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب را مقایسه کنید). برخلاف رویداد اول، ناپایداری زیادی در سازوکار رویداد دوم با تغییر باند بسامدی دیده می‌شود. همچنین فاصله زمانی دو رویداد نیز به‌رغم اینکه وارون‌سازی رویدادهای اول و دوم در یک نقطه صورت می‌گیرد، حدود ۸ ثانیه است

با توجه به بزرگی زمین لرزه، وجود چنین فاصله زمانی میان دو رویداد بعید به نظر می‌رسد. بنابراین تفسیر دو رویداد برای چشمه مسبب این زمین لرزه منطقی به نظر نمی‌رسد.

۸ بررسی زمین لرزه ۲۵/۰۳/۲۰۰۶ فین

زمین لرزه دیگر مورد بررسی در این تحقیق، زمین لرزه فین است. به منظور خلاصه‌سازی، از تکرار مراحل حل CMT زمین لرزه پرهیز می‌شود و صرفاً نتایج نشان داده خواهد شد. مدل پوسته قدس و همکاران (۲۰۱۰) بیشترین همبستگی را میان لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی ایجاد کرد. عمق بهینه زمین لرزه در هفت کیلومتری تعیین شده است. جست‌وجوی مکان بهینه CMT در عمق هفت کیلومتری و در باند بسامدی ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، چشمه‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۱۰ همگی می‌توانند جواب بهینه CMT باشند (مقادیر همبستگی برای آنها به ترتیب برابر با ۹۰، ۸۷ و ۸۶ است). جواب شماره ۱۸ حل CMT به هنگام وارون‌سازی درصد دو زوج نیروی ۳۵ تا ۵۱ درصدی را نشان می‌دهد. اما جواب‌های شماره ۱۷ و ۱۰ درصد دو زوج نیروی ۷۵ و ۷۷ درصدی را نشان می‌دهند.

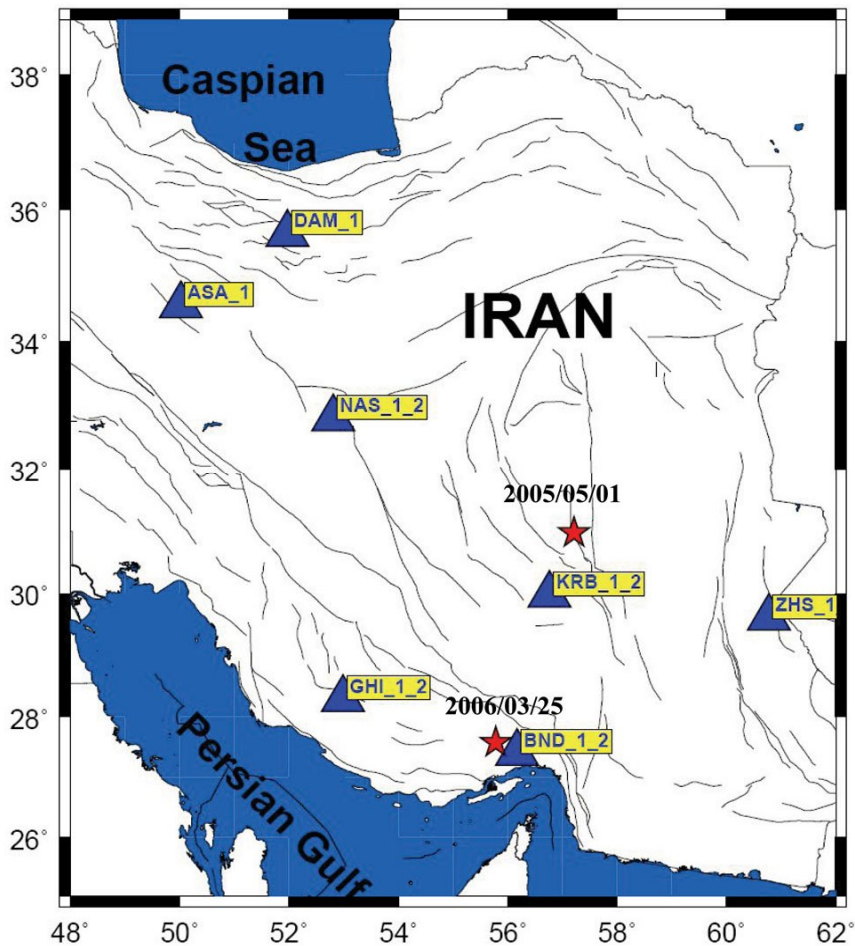
مولفه‌های آنها صورت گرفت و در نهایت ایستگاه‌ها و مولفه‌های که همبستگی لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی در آنها کم بود، از وارون‌سازی حذف شدند. عمق بهینه زمین لرزه در هفت کیلومتری تعیین شد و مکان بهینه مرکزوار ۱۰ کیلومتر به سمت شمال و ۱۰ کیلومتر به سمت شرق نسبت به مکان اولیه گزارش شده (IIEES) جابه‌جا شده است. به هنگام وارون‌سازی (حذف ایستگاه‌ها و مولفه‌های آنها) درصد دو زوج نیروی تانسور ممان از ۷ تا ۵۰ درصد تغییر کرد. در مکان بهینه حل CMT این زمین لرزه شاهد درصد بالای مولفه غیر دو زوج نیرو تا ۷۰ درصد هستیم.

اکنون وارون‌سازی را در حالت تانسور انحرافی و تانسور دو زوج نیروی خالص برای باندهای بسامدی ۰/۰۲-۰/۰۷ هرتز تا ۰/۰۲-۰/۱۳ هرتز با افزایش ۰/۰۱ هرتز در هر مرحله، به انجام می‌رسانیم. رسم نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی و درصد دو زوج نیروی تانسور ممان وجود رویداد دوم را برای چشمه این زمین لرزه نشان نمی‌دهد (به مقادیر همبستگی برای رویداد دوم توجه کنید) (شکل ۱۲-ج). در شکل ۱۳ نمودار لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای (رنگ مشکی)، رویداد اول (رنگ سرخ) و رویداد اول و دوم (آبی) برای ایستگاه KRB برای وارون‌سازی در باند بسامدی ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ هرتز نشان داده شده است. برخلاف مورد آزمایشی در شکل ۳ که چشمه زمین لرزه دوم تاثیر زیادی در بهینه‌سازی شکل موج مصنوعی داشت، در اینجا اضافه کردن چشمه زمین لرزه دوم، فقط ۰/۰۱ مقدار کاهش واریانس را افزایش می‌دهد.

زمین لرزه اول به تنهایی مقدار کاهش واریانس را به ۶۳ درصد می‌رساند و این در حالی است که در نتیجه وارون‌سازی در حالت انحرافی حل تانسور ممان، مقدار کاهش واریانس ۶۴ درصد است. به نظر می‌رسد وجود درصد زیاد مولفه غیر دو زوج نیرو در حالت انحرافی،

زمین‌لرزه با استفاده از محاسبه توابع گرین برای بسامدهای بیشتر به انجام می‌رسد و امکان وجود چند رویداد در چشمه این زمین‌لرزه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به عدم قطعیت موجود در تعیین مکان CMT و درصد زیاد مولفه غیر دو زوج نیرو در مکان بهینه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، وارون‌سازی را در باندهای بسامدی بیشتر با اضافه کردن ۰/۰۱ هرترتز به باند بسامدی در هر بار به انجام رساندیم.

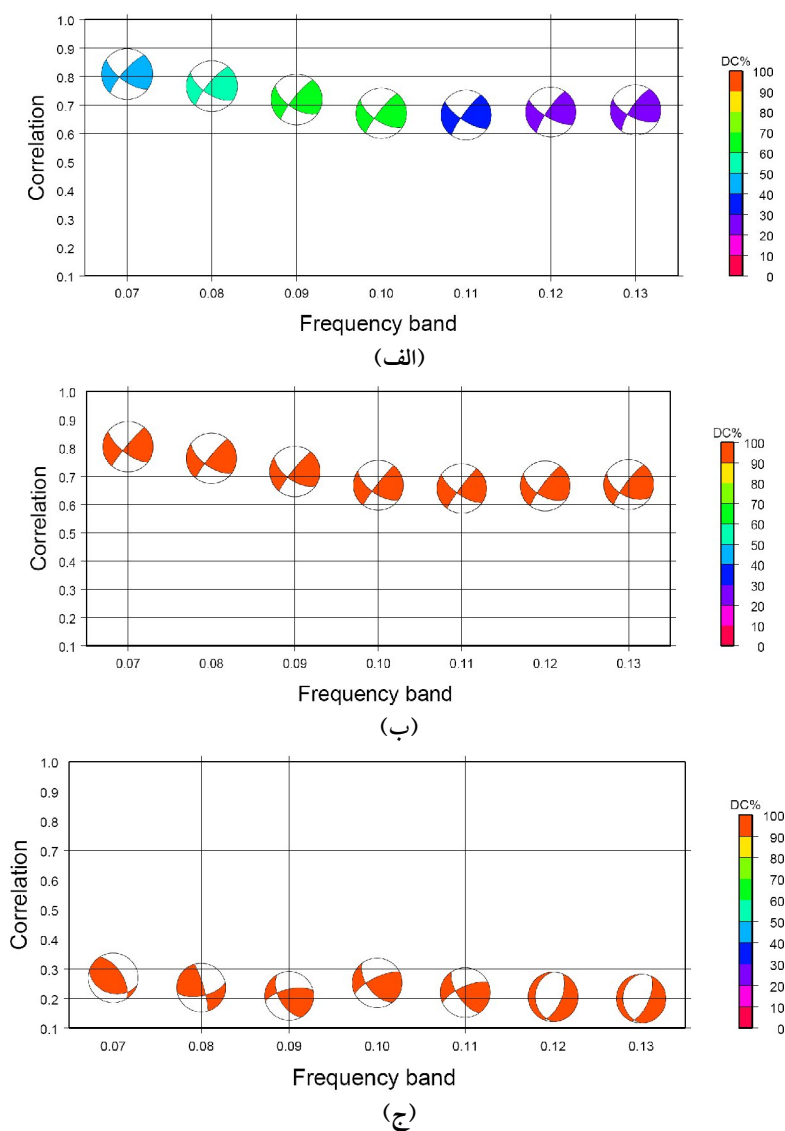
سازوکارهای به‌دست آمده در این تحقیق و تحقیقات دیگران (روستایی و همکاران، ۲۰۱۰) نشان‌دهنده گسلی معکوس با راستای شرقی-غربی است، به طوری که یکی از صفحه‌ها دارای شیبی به سمت شمال و دیگری شیبی به سمت جنوب است. تحقیقات INSAR و پس‌لرزه‌ها (شکل ۱۵) در روستایی و همکاران (۲۰۱۰)، نتوانسته است صفحه گسل را مشخص کند و عملاً هر دو صفحه می‌توانند معروف چشمه زمین‌لرزه باشند. در اینجا حل CMT این



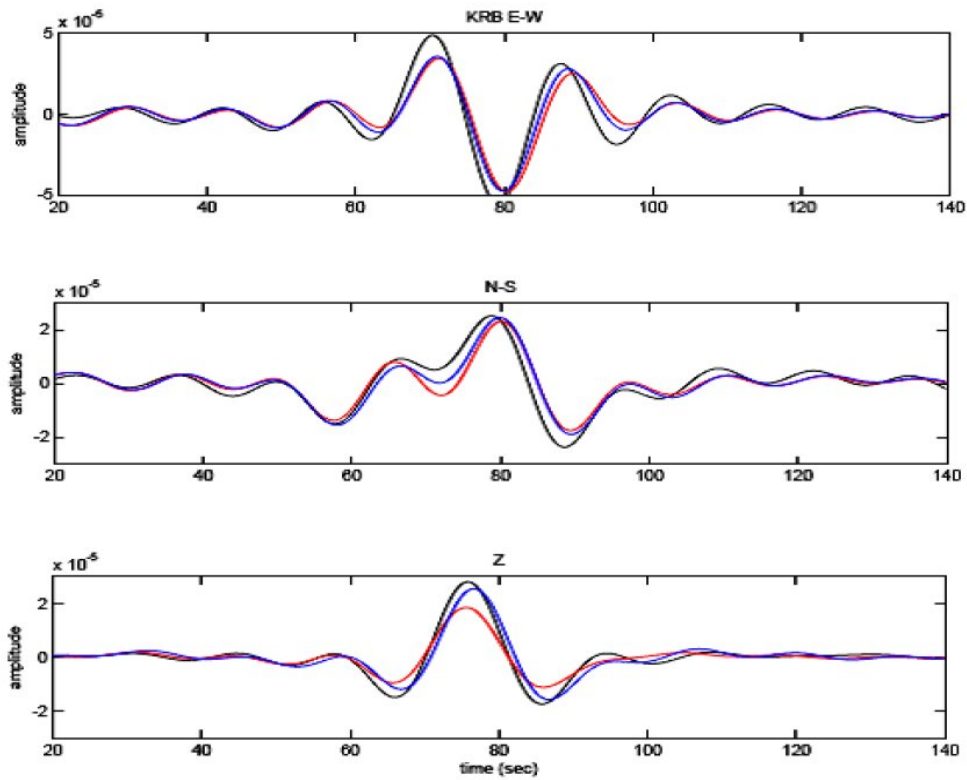
شکل ۱۱. سازوکار و مکان مرکزوار تعیین شده در این تحقیق برای دو زمین‌لرزه با درصد دو زوج نیروی بالا در ایران مرکزی و جنوب ایران. روی زمین‌لرزه، تاریخ وقوع آن نیز نشان داده شده است. در این شکل، همچنین، وضعیت ایستگاه‌های IIEES برای زمین‌لرزه ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ با پسوند ۱ و پسوند ۲ برای زمین‌لرزه ۲۰۰۶/۰۳/۲۵ روی نام ایستگاه نشان داده شده است.

۵۰ درصد). وارون‌سازی در حالت تانسور دو زوج نیرو خالص، برای تعیین دو رویداد صورت گرفت. وارون‌سازی برای بسامدهای بیش از ۰/۱ پایداری خوبی را نشان می‌دهد، و به وضوح دو رویداد را با فاصله ۱۰ کیلومتری و اختلاف زمانی ۳/۶ ثانیه‌ای نمایان می‌سازد (شکل ۱۶).

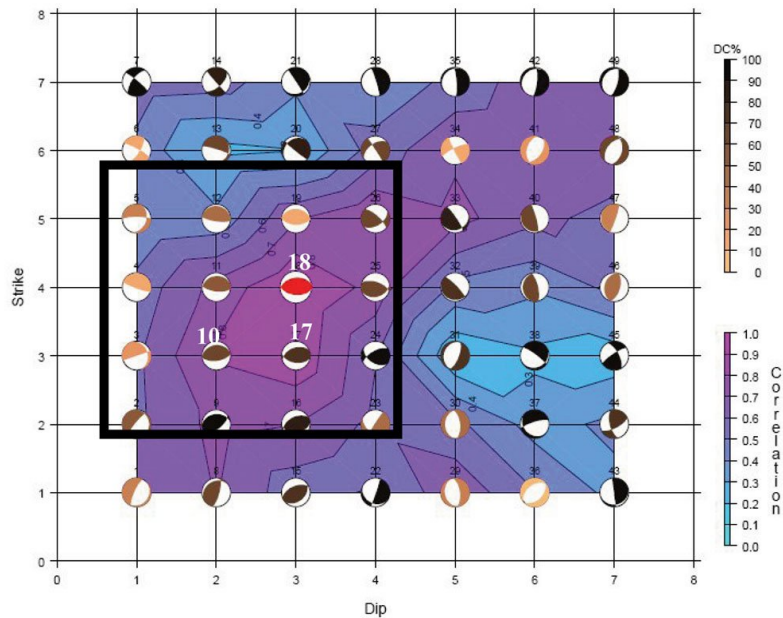
بدین منظور وارون‌سازی را برای شبکه‌ای ۱۶ تایی (۴ در ۴) از نقاط که شامل نقاط ۱۸، ۱۷ و ۱۰ در مرحله اول باشند، عملی کردیم (کادر مشکی در شکل ۱۴). نتایج وارون‌سازی در باندهای بسامدی بالاتر در حالت انحرافی تانسور ممان نشان‌دهنده درصد زیاد مولفه غیر دو زوج نیرو برای چشمه‌های شماره ۱۸، ۱۷ و ۱۰ است (بیش از



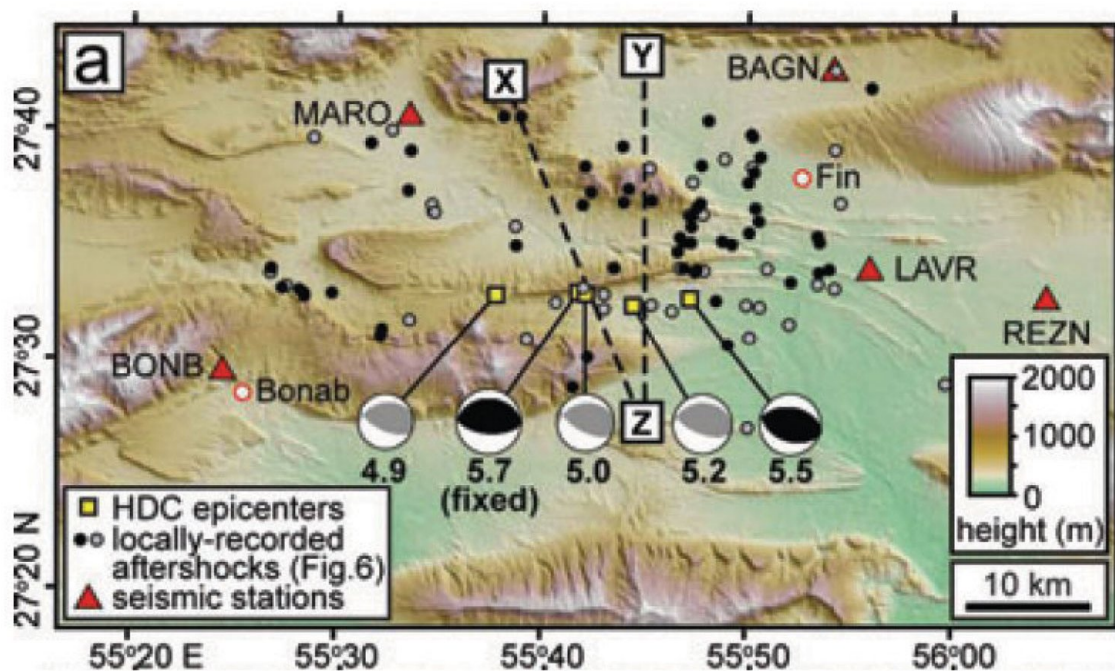
شکل ۱۲. نمودار همبستگی برحسب باند بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی تانسور ممان، (الف) در حالت انحرافی حل تانسور ممان، (ب) رویداد دو زوج نیروی اول و (ج) رویداد دو زوج نیروی دوم، برای چشمه مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ رسم شده است.



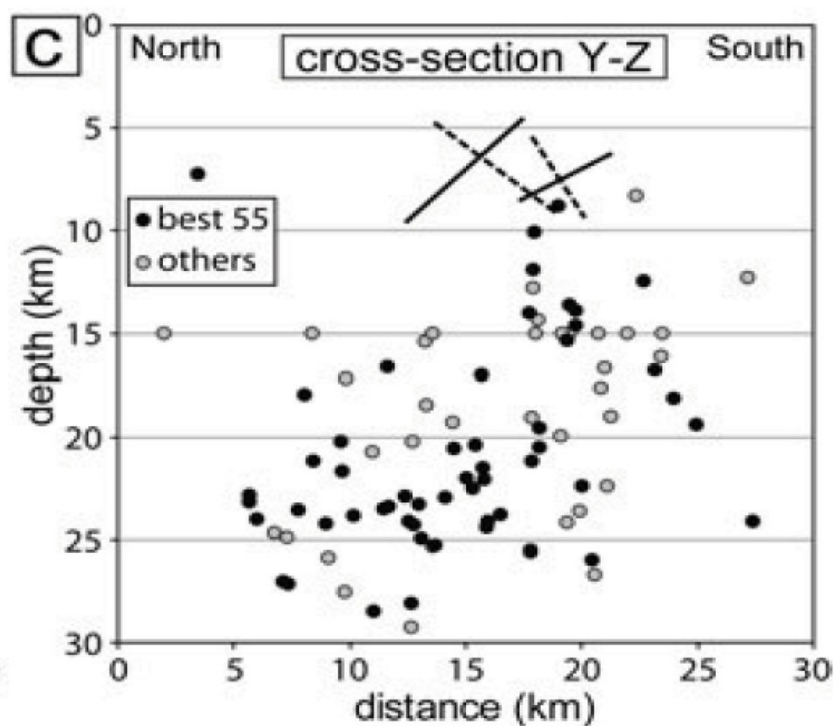
شکل ۱۳. شکل موج مشاهده‌ای (مشگی)، شکل موج ناشی از رویداد اول (سرخ) و شکل موج ناشی از رویداد اول و دوم (آبی) و درصد کاهش واریانس برای زمین‌لرزه اول (سرخ) و زمین‌لرزه اول و دوم (آبی) نشان داده شده است باند بسامدی در وارون‌سازی ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ انتخاب شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، زمین‌لرزه دوم تأثیر چندانی (در مقایسه با شکل ۳) در بهینه‌سازی همبستگی لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی ندارد.



شکل ۱۴. مکان جواب بهینه در عمق ۷ کیلومتری برای زمین‌لرزه اصلی فین نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود چشمه‌های شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۰ همگی می‌توانند جواب بهینه باشند.



(الف)

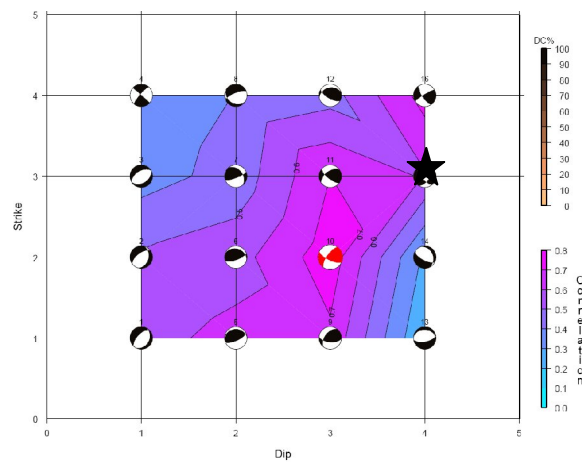


(ب)

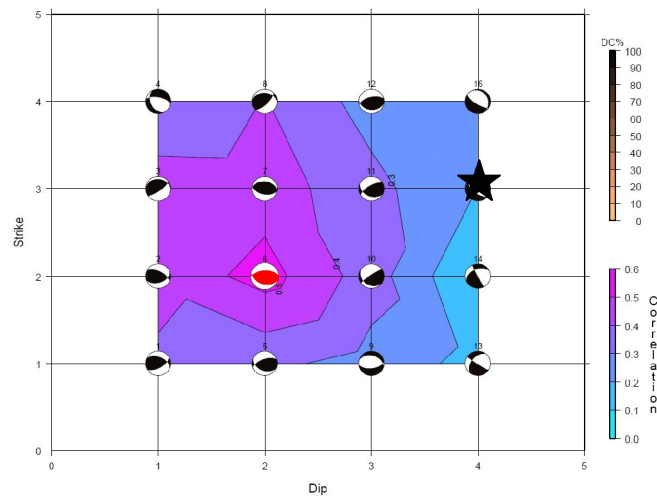
شکل ۱۵. (الف) نتیجه تحقیق روستایی و همکاران، (۲۰۱۰) و پس‌لرزه‌هایی که با ایستگاه‌های موقت مکان‌یابی شده‌اند و (ب) تصویر مقطع شمال جنوب روی خط چین Y-Z نشان داده شده است. صفحه‌های اصلی و کمکی (نتیجه بررسی INSAR) زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه نیز نشان داده شده است. گسترش پس‌لرزه‌ها عملاً اطلاعات چندانی راجع به صفحه اصلی گسلش در اختیار قرار نداده است (روستایی و همکاران، ۲۰۱۰).

به نظر می‌رسد که صفحه زمین‌لرزه اصلی فین دارای پیچیدگی باشد، چرا که در وارون‌سازی، حل بهینه زمین‌لرزه در حالت انحرافی حل تانسور ممان درصد غیر دو زوج نیروی بالای را نشان می‌دهد. همچنین حل تانسور ممان برای بسامدهای بیشتر از ۰/۱ در حالت دو زوج نیرو، وجود دو رویداد با فاصله ۱۰ کیلومتری (با فاصله زمانی ۳/۶ ثانیه) را نشان می‌دهد.

با توجه به بزرگی گشتاوری زمین‌لرزه، ۵/۸، براساس روابط تجربی (سامرویل و همکاران، ۱۹۹۹) ابعاد صفحه گسل حدود ۷۰ کیلومتر مربع است. بنابراین وجود دو رویداد با فاصله ۱۰ کیلومتر غیرمحمتمل نیست. همچنین وجود فاصله زمانی منطقی میان دو رویداد (۳/۶ ثانیه) تاییدکننده وجود رویداد دوم است. در شکل ۱۷-الف و ۱۷-ب به ترتیب رویداد اول و دوم و بررسی‌های صورت گرفته در بررسی‌های INSAR نشان داده شده است.

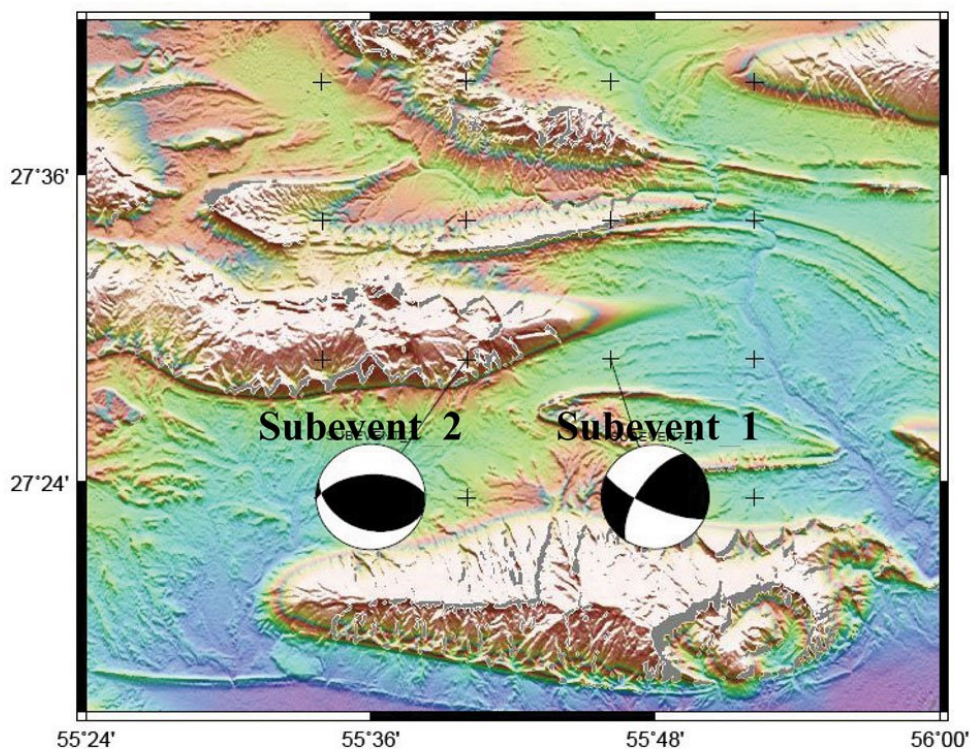


(الف)

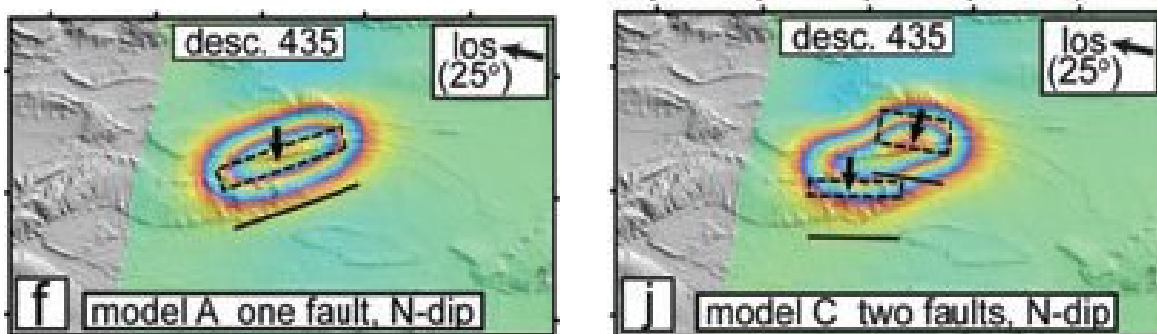


(ب)

شکل ۱۶. (الف) وارون‌سازی تانسور دو زوج نیروی خالص برای تعیین رویداد اول در عمق هفت کیلومتری در باند بسامدی ۰/۰۲ تا ۰/۱۲. مکان اولیه گزارش شده IIEES با ستاره مشکی نشان داده شده است. حل CMT در این حالت نشان‌دهنده وجود مولفه امتدادلغز در تعیین سازوکار زمین‌لرزه است و (ب) حل تانسور ممان برای رویداد دوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود رویداد دوم دارای سازوکار معکوس است. اختلاف زمانی این دو رویداد ۳/۶ ثانیه است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷. (الف) نتایج تعیین دو رویداد در باند فرکانسی ۰/۰۲ تا ۰/۱۲ برای زمین لرزه اصلی فین، در این مطالعه، نشان داده شده است. علامت های به علاوه نشان دهنده نقاط جستجوی رویدادهای اول و دوم است. فاصله این نقاط ۱۰ کیلومتر است. (ب) مدل سازی داده ای INSAR که با فرض یک صفحه و دو صفحه برای زمین لرزه انجام شده است، نشان داده شده است. تعیین دو سازوکار برای این زمین لرزه هماهنگی خوبی با نتایج مدلسازی دو صفحه ای در مطالعات INSAR را نشان می دهد.

حاصل جمع لرزه‌نگاشت‌های دو رویداد دو زوج نیروی خالص که در فاصله زمانی و مکانی کمی از هم قرار دارند صورت گرفت. سپس با وارون‌سازی لرزه‌نگاشت‌های چشمه تولید شده، به بررسی تاثیر باند بسامدی مورد

۹ نتیجه‌گیری

این تحقیق شامل دو بخش است. در بخش اول سعی شده است تا با مدل‌سازی مصنوعی، یک چشمه پیچیده با درصد غیر دو زوج نیروی بالا تولید شود. این کار با

این زمین‌لرزه وجود دو چشمه با فاصله ۱۰ کیلومتری منطقی به نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای پرفسور زاهرانیک و دکتر مهرداد پاکزاد به خاطر راهنمایی‌های ارزنده ایشان در زمینه وارون‌سازی لرزه‌نگاشت‌های زمین‌لرزه به روش ایزولا کمال تشکر را داریم. در این تحقیق از نرم‌افزارهای CPS, GMT, ISOLA و SAC استفاده شد که از پدید آورندگان آن، قدردانی می‌شود. از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های شکل موج کمال تشکر را داریم. در پایان از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر حمایت از این طرح پژوهشی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- Bouchon, M., 1981, A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media: Bulletin of the Seismological Society of America, **71**, 959-971.
- Dahm, T., Manthei, G., and Eisenblatter, J., 1999, Automated moment tensor inversion to estimate source mechanisms of hydraulically induced micro-seismicity in salt rock: Tectonophysics, **306**, 1-17.
- Frohlich, C., 1994, Earthquakes with non-double-couple mechanisms: Science, **264**, 804-809.
- Ghods, A., Rezapour, M., Bergman, E., Gholamreza, M., and Talebian, M., 2010, Fault segmentation and stress triggering in the March 31, 2006 Silakhor earthquake. Conference on Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia in Turkey.
- Julian, B. R., Miller, A. D., and Foulger, G. R., 1998, Non-double-couple earthquake 1 Theory: Reviews of Geophysics, **36**, 525-549.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves -III: Bulletin of the Seismological Society of America, **81**, 2335-2350.
- Miller, A. D., Foulger, G. R., and Julian B. R., 1998, Non-double-couple earthquake 2 Observations: Reviews of Geophysics, **36**, 551-568.

استفاده، ممان لرزه‌ای هر رویداد، و فاصله زمانی و مکانی رویدادها در نتایج وارون‌سازی پرداخته شد. در نتایج این بخش مشخص شد که با افزایش ممان لرزه‌ای رویداد دوم درصد دو زوج نیروی تانسور ممان (در حالت انحرافی حل تانسور ممان) افزایش می‌یابد و همچنین مشخص شد که استفاده از باندهای بسامدی بالا (بیش از ۰/۱ هرتز) در وارون‌سازی برای تعیین صحیح سازوکار هر دو رویداد ضروری است. در این تحقیق فواصل زمانی و مکانی دو رویداد نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که هرچه فاصله دو رویداد (زمانی و مکانی) بیشتر باشد تعیین سازوکار آنها از پایداری بیشتری برخوردار است. در بخش دوم نتایج به دست آمده در مدل‌سازی مصنوعی برای دو زمین‌لرزه واقعی در ایران مرکزی و جنوب ایران مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی‌های اولیه حل تانسور ممان در حالت انحرافی تانسور ممان، این دو زمین‌لرزه درصد دو زوج نیروی پایینی را نشان دادند. بنابراین برای بررسی احتمالی پیچیدگی چشمه انتخاب شدند. مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه ایران مرکزی با بزرگی گشتاوری ۵ مورخ ۲۰۰۵/۰۵/۰۱ در ساعت ۱۸:۵۸ به صورت دو رویداد دو زوج نیرو که در نزدیکی هم قرار گرفته‌اند، روشن ساخت که برای چشمه این زمین‌لرزه، وجود رویداد دوم محتمل به نظر نمی‌رسد. فاصله زمانی دو رویداد برای این زمین‌لرزه حدود ۶ تا ۸ ثانیه است که برای زمین‌لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری ۵ بعید به نظر می‌رسد. همچنین رویداد دوم تاثیر چندانی در بهینه‌سازی همبستگی لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی ندارد (فقط یک درصد). اما برای زمین‌لرزه فین در جنوب ایران و در منطقه زاگرس تفسیر متفاوتی دیده شد. مدل‌سازی چشمه این زمین‌لرزه به صورت دو رویداد دو زوج نیرو، وجود دو رویداد با فاصله مکانی ۱۰ کیلومتری و فاصله زمانی ۳/۶ ثانیه‌ای از یکدیگر را نشان می‌دهد. با توجه به بزرگی گشتاوری ۵/۷

- of regional waveforms and double-event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 159-172.
- Zahradnik, J., Sokos, E., Tselentis, G. A., and Martakis, N., 2008b, Non-double-couple mechanism of moderate earthquakes near Zakynthos, Greece, April 2006: Explanation in terms of complexity: *Geophysical Prospecting*, **56**, 341-356.
- Roustaei, M., Nissen, E., Abbassi, M., Gholamzadeh, A., Ghorashi, M., Tatar, M., Yamini-Fard, F., Bergman, E., Jackson J., and Parsons, B., 2010, The 2006 March 25 Fin earthquakes (Iran)-insights into the vertical extents of faulting in the Zagros Simply Folded Belt: *Geophys. J. Int.*, **181**, 1275-1291.
- Roessle, D., Krueger, F., and Ruempker, G., 2007, Inversion for seismic moment tensors in anisotropic media using standard techniques for isotropic media: *Geophys. J. Int.*, **169**, 136-148.
- Sarao, A., Panza, G. F., Privitera, E., and Cocina, O., 2001, Non-double couple mechanisms in the seismicity preceding the 1991-1993 Etna volcano eruption: *Geophys. J. Int.*, **145**, 319-335.
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A., 1999, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion: *Seismological Research Letters*, **70**, 59-80.
- Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., and Tselentis, G. A., 2005, Iterative deconvolution