

## بررسی عوامل موثر بر وارون سازی یک چشمه پیچیده زمین لرزه‌ای با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی

امیره سیالی<sup>۱</sup>، محمدرضا حاتمی<sup>۱\*</sup> و ظاهر حسین شمالی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۹/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۷)

### چکیده

انحراف زمین لرزه‌ها از سازوکار دو زوج نیرو بسیار مهم و یک ابزار حساس برای بررسی فرایندهای چشمه آنها است. این باور وجود دارد که سازوکار کانونی زلزله‌ها نه تنها اطلاعاتی در مورد میدان تنش فراهم می‌سازد بلکه در مورد پدیده گسیخت مانند بازشدگی ترک‌ها نیز اطلاعاتی به دست می‌دهد، به همین علت انحراف از سازوکار دو زوج نیرو، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از طرف دیگر تغییرات زمانی پیچیده آزادسازی انرژی، مانند جابه‌جایی‌های سطحی غیریکنواخت در امتداد برونزد گسل‌های سطحی، یک خصوصیت گسیخت در زمین لرزه‌های بزرگ است.

به علت اهمیت نحوه گسیخت در یک زمین لرزه و بررسی اینکه یک رخداد با درصد غیر دو زوج نیروی زیاد می‌تواند شامل چند زیررخداد با فواصل مکانی و زمانی کم باشد، شناخت این موضوع نیازمند بررسی دقیق‌تر با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی و تحلیل آن است. در این تحقیق لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از مجموعه نرم‌افزاری CPS تولید و لرزه‌نگاشت حاصل از زمین-لرزه اصلی و زیررخداد آن با همدیگر جمع و لرزه‌نگاشت حاصل مبنای کار واقع شده است. در واقع با مدل سازی یک چشمه با درصد غیر دو زوج نیروی زیاد (حاصل جمع دو زیررخداد ۱۰۰ درصد دو زوج نیرو)، توانایی روش ISOLA برای تشخیص دو زیررخداد با سازوکارهای متفاوت، تحلیل می‌شود. نوار بسامدی، مدل سرعتی پوسته، نسبت گشتاور زمین لرزه‌ها و میزان نوفه افزایشی به‌منزله عوامل تاثیرگذار بر بازیابی موفقیت آمیز دو زیررخداد تعیین شد.

**واژه‌های کلیدی:** سازوکار غیر دو زوج نیرو، نرم‌افزار ایزولا، مدل سازی یک چشمه با درصد غیر دو زوج نیروی زیاد

### An investigation of factors affecting the inversion of a complex earthquake source using synthetic seismograms

Amireh Sayali<sup>1</sup>, Mohammadreza Hatami<sup>1\*</sup> and Zaherhosein Shomali<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 10 December 2012, accepted: 29 July 2013)

\*Corresponding author:

mrhatami@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

In many earthquake source studies, the seismic source is assumed to have a double-couple (DC) source mechanism, matching shear motion on a planar fault. Observations of increasing quality and coverage, however, resolve departures from the DC model for many earthquakes and find some earthquakes, especially in volcanic and geothermal areas, that have strongly non-DC mechanisms. Burdick and Mellman (1976) used a time-domain inversion method to determine some of the complexity of the source time function. Several attempts have been made to explain the complexity of body waves from large earthquakes by using a multiple event model (Kikuchi and Kanamori, 1982).

Deviation of earthquakes from the double-couple (DC) mechanism is an important, but delicate tool to study their source processes. It is believed that the earthquake focal mechanisms not only provide information regarding the stress field, but also give information about the rupture phenomena e.g. crack opening. Hence, the deviation from the double-couple mechanism is a matter of investigation. In fact, the study of the non-DC components makes opportunity to provide information about the earth processes. This information may be used to facilitate the operation of the geothermal energy and help predict volcanic activity. On the other side, the complex time history of energy release is a common attribute of large earthquake failures, as is the presence of non-uniform surface displacement along the outcrop of surface-breaking faults.

An interesting topic is the search for the connections between the non-DC events, multiple-double-couple events, segmentation of faults and their fractal properties. Critical papers emphasize difficulties in obtaining reliable non-DC components, e.g. due to noise, poor station coverage or incomplete structural models. Understanding non-DC earthquakes is important both for studying the process of faulting in detail and for identifying nonshear-faulting processes that apparently occur in some earthquakes.

To assess the non-double-couple component, a new method is suggested, i.e., a hierarchic grid search of the centroid position and time, during which the double-couple percentage (DC%) convergence is studied (Sokos and Zahradnik, 2008). This article uses the iterative deconvolution of multiple point sources, based on Kikuchi and Kanamori (1991), often used to study complexity of earthquakes. The method was modified for regional distances by Zahradnik *et al.* (2005). The modification involves the full Green's functions (Bouchon 1981, 2003). Possibly complex events are represented by multiple point source models, which may represent their isolated asperities (Zahradnik and Sokos, 2008). ISOLA calculates the moment tensors (MT) by the least-square fitting of the complete waveforms in the time domain (Zahradnik and Sokos, 2005).

Due to the significance of an earthquake rupture process and investigating whether an event of high non-DC percentage can consist of several subevents with slight spatial and temporal intervals, this survey involves more accurate investigation using synthetic seismograms and their analysis. In this study, synthetic seismograms are produced using CPS software package and the seismograms of the main earthquake and its subevent were summed together and the resulting seismogram provided a basis for further studies. In fact, by modeling a source of high non-DC percentage (resulted from summing two 100% DC subevents), the ability of ISOLA to distinguish two subevents with different focal mechanisms is analyzed. Frequency band, crustal velocity model, moment ratio of earthquakes and the added noise value are determined as factors affecting successful retrieval of the two subevents.

**Keywords:** Non-DC focal mechanism, ISOLA software, modeling a source of high non-double-couple percentage

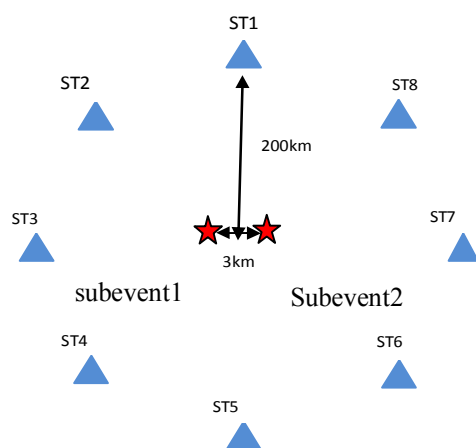
## ۱ مقدمه

های نرمال حرکت برای سطوح گسل تشخیص داده شوند. پیشرفت در بررسی سازوکار زلزله‌ها، به‌ویژه مولفه non-DC می‌تواند نقشی مهم در روشن ساختن عامل‌هایی مانند پیچیدگی هندسی گسل، شکست کششی، اتساع و جریان‌های شاره در گسلش‌ها داشته باشند.

برای چشمه‌هایی که مولفه غیردوزوج نیروی قوی دارند، دو روش برای مدل‌سازی چشمه زمین‌لرزه پیشنهاد می‌شود: در روش اول زمین‌لرزه را به‌صورت یک چشمه با مولفه دوزوج نیرو (DC) و مولفه غیر دو زوج نیرو (CLVD) و حجم در نظر می‌گیرند. در روش دیگر، رخداد را به‌صورت یک رخداد اصلی و چندین زیررخداد با جهت‌گیری‌های گسلی متفاوت با مولفه‌های دو زوج نیرو ارزیابی می‌کنند. این زلزله‌ها تحت عنوان زمین لرزه‌های پیچیده معرفی و تحلیل می‌شوند.

شکل موج امواج حجمی، اطلاعات مهمی در مورد جزئیات فرایند گسیخت فراهم می‌آورد. اولین تلاش‌ها برای توضیح پیچیدگی امواج حجمی زمین‌لرزه‌های بزرگ با استفاده از مدل چندرخدادی شامل فازهای مجزای تشخیص داده شده در سیگنال امواج حجمی با

به‌طور تاریخی، تحلیل کمی در لرزه‌شناسی بیشتر براساس این فرض است که علت زمین‌لرزه‌ها، گسلش بُرشی است. نیروی معادل این نوع گسلش در زمین یک‌روند دو زوج نیروی بدون گشتاور (DC) است. با افزایش کیفیت مشاهدات و پوشش ایستگاهی بهتر، نواقص مدل DC برای بسیاری از زمین‌لرزه‌ها آشکار شده است. برخی از زمین‌لرزه‌ها به‌ویژه زلزله‌های مناطق آتشفشانی و زمین‌گرمایی انحراف شدید از سازوکار دو زوج نیرو را نشان می‌دهند. علت‌های فیزیکی برای این زلزله‌ها هنوز به‌خوبی درک نشده و این احتمال می‌رود که بیش از یک فرایند در این رخدادها درگیر باشد. در حال حاضر، انحراف‌های کوچک از مدل DC تقریباً برای همه زلزله‌هایی که به‌طور معمول با استفاده از داده‌های باکیفیت شبکه‌های زلزله‌سنج جهانی بررسی می‌شوند، دیده می‌شود. این مولفه‌های non-DC احتمالاً حاصل از داده‌های نوفه‌ای یا روش‌های ناقص مدل‌سازی است و بسیاری از آنها نیز به‌خوبی حل می‌شوند. این انحرافات باید از مدل‌های گسلش آرمانی مانند پیچش گسل‌ها و یا مولفه-



**شکل ۱.** موقعیت ایستگاه‌ها (مثلث‌های آبی‌رنگ) و چشمه‌ها (ستاره‌های سرخ‌رنگ) در شکل نشان داده شده است. دو رخداد در عمق ۶ کیلومتری بوده‌اند و فاصله چشمه‌ها از ایستگاه‌ها تقریباً ۲۰۰ کیلومتر است. ایستگاه‌ها روی دایره‌ای به مرکز چشمه‌ها و با آزیموت‌های ۴۵ درجه‌ای از هم جدا شده‌اند. لرزه‌نگاشت‌های تولید شده برای هر زیررخداد در هر ایستگاه با جابه‌جایی زمانی ۱ ثانیه و جابه‌جایی مکانی ۳ کیلومتر با هم جمع شده‌اند. سازوکار کانونی مربوط به دو زیررخداد نیز در شکل نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل سرعتی به کار رفته در تولید لرزه نگاشت‌های مصنوعی.

Depth of layer top (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Rho (g/cm**3)
0	5.47	2.7	2.56
2	5.5	2.86	2.8
5	6	3.23	2.94
10	6.2	3.24	2.94
15	6.48	3.4	2.98
20	6.7	3.8	2.98
30	6.75	3.81	2.98
40	8	4.66	3.36

در ۱۹۸۲ کیکوچی و کاناموری، یک روش عددی بر پایه واهمامیخت امواج حجمی پیچیده در یک رخداد چندلرزه‌ای عرضه کردند. در مدل کیکوچی و کاناموری (۱۹۸۲)، فرض شده است که همهٔ زیررخدادها، سازوکار یکسانی دارند، اما ممکن است حالت‌هایی وجود داشته باشد که تغییرات قابل توجه در سازوکار در طی رخداد به وقوع بپیوندد. عموماً تانسورهای گشتاور برای توصیف چشمه نقطه‌ای لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. هسته اصلی روش بازیابی تانسور گشتاور، بر پایه واهمامیخت

توجه به شروع رخدادهای مجزا و مکان آنها، را ایمامورا (۱۹۳۷)، میامورا و همکاران (۱۹۶۴)، ویس و بران (۱۹۶۷) عملی ساختند. باردیک و ملمن (۱۹۷۶) از روش وارون‌سازی در حوزه زمان برای تعیین برخی پیچیدگی‌های تابع زمانی چشمه استفاده کردند. کاناموری و استوارت (۱۹۷۸)، شکل موج‌های موج P حاصل از زلزله گواتمالا را با تطبیق دادن آن بر یک دسته از تابع‌های زمانی دوزنقه‌ای مدل کردند. ریال (۱۹۷۸)، زلزله کاراکاس را با سه رخداد جدا از هم مدل کرد.

0.01-0.04	1.83e+18	7.14e+17	1.51e+18	4.69e+17	1.51e+18	1.56e+18	6.63e+16	1.56e+18
0.03-0.06	1.83e+18	7.14e+17	1.71e+18	6.24e+17	1.54e+18	1.73e+18	1.88e+17	1.73e+18
0.05-0.08	1.83e+18	7.14e+17	1.57e+18	5.19e+17	1.61e+18	1.73e+18	2.68e+17	1.73e+18
0.01-0.06	1.83e+18	7.14e+17	1.70e+18	6.22e+17	1.70e+18	1.72e+18	1.68e+17	1.72e+18
0.01-0.11	1.83e+18	7.14e+17	1.68e+18	5.64e+17	1.68e+18	1.75e+18	2.80e+17	1.75e+18
F-B(Hz)	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۲. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی محض. به ترتیب از چپ به راست، در ستون اول محدوده بسامدی مورد استفاده در عملیات وارون‌سازی آورده شده است، کره‌ها (beach balls) دو چشمه ۱۰۰٪ دو زوج نیرو، که با S1 و S2 نشان داده و در هنگام تولید لرزه نگاشت‌ها با همدیگر جمع شده‌اند. دو زیررخداد به دست آمده از وارون‌سازی در حالت دو زوج نیروی مقید شده (DC1, DC2)، نتیجه حاصل از وارون‌سازی برای مجموع دو زیررخداد (DC1+DC2)، دو زیررخداد به دست آمده از وارون‌سازی در حالت انحرافی (DEV1, DEV2) و نتیجه به دست آمده از وارون‌سازی در حالت انحرافی با در نظر گرفتن یک رخداد (DEV1+DEV2). ارقام درج شده روی هر کره کانونی (beach balls)، بزرگی‌های به دست آمده در وارون‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات رخداد اصلی (subevent1) و زیررخداد (subevent2). لرزه‌نگاشت‌های مربوط به این دو رخداد در مرحله تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با همدیگر جمع و در وارون‌سازی مورد استفاده واقع شده‌اند.

	Mo (Nm)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	%DC
Sub1	183e+18	211	80	122	316	33	19	100
Sub2	7.14e+17	290	76	-88	102	14	-97	100
Sum of sub1 and sub2	1.82e+18	210	85	125	306	36	8	38

براساس رابطه زیر تعریف می‌شود (آکی و ریچاردز، ۱۹۸۰):

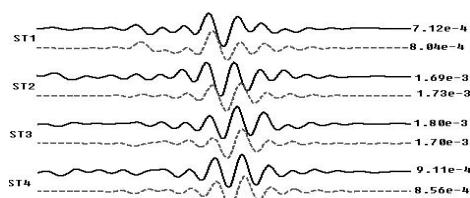
$$u_n(x, t) = S(t) * G_{ni,j}(x, t; \xi, \tau) * M_{ij}(\xi, \tau), \quad (1)$$

که  $u(x, t)$  جابه‌جایی ناشی از زمین‌لرزه در محل ایستگاه و  $S(t)$  تابع زمانی چشمه و بیانگر نحوه آزاد شدن انرژی در حین زمین‌لرزه است.  $G_{ni,j}(x, t; \xi, \tau)$  تابع گرین، بیان‌کننده مشخصات محیط انتشار بین چشمه در مختصات  $(\xi, \tau)$  و ایستگاه در مختصات  $(x, t)$  و  $M_{ij}$  تانسور گشتاور لرزه‌ای است. معادله بالا با استفاده از روش خطی کمینه مربعات حل و مولفه‌های تانسور گشتاور محاسبه می‌شود. در این پژوهش لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی برای دو رخداد با فاصله ۳ کیلومتر از همدیگر و اختلاف زمانی ۱ ثانیه (با در نظر گرفتن سرعت گسیخت برابر با  $V_r = 3 \text{ km/sec}$ )، برای هشت ایستگاه روی دایره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر تولید شده است (شکل ۱). از مدل پوسته‌ای با مشخصات درج شده در جدول ۱ در تولید لرزه‌نگاشت‌ها استفاده شد. چشمه زمین‌لرزه‌ها در عمق ۶

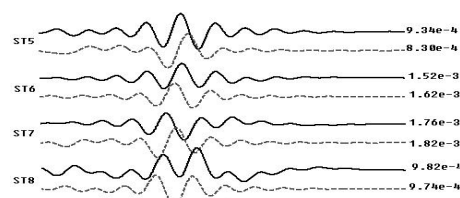
تکراری است که کیکوچی و کاناموری (۱۹۹۱) آن را برای داده‌های دورلرزه‌ای گسترش دادند و اغلب برای بررسی پیچیدگی زمین‌لرزه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش را زاهدانیک و همکاران (۲۰۰۵)، برای فواصل ناحیه‌ای به کار بردند. در این روش، تابع‌های گرین را به روش عدد موج گسسته بوشن (بوشن، ۱۹۸۱) محاسبه می‌کنند. زاهدانیک و سوکوس (۲۰۰۷) یک بسته نرم‌افزاری (با نام ایزولا) برای وارون‌سازی چشمه تک نقطه‌ای و چند نقطه‌ای عرضه کردند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ایزولا و به‌طور مصنوعی معادل بودن مدل دو رخداد ۱۰٪ دوزوج نیرو و یک تک رخداد با مولفه غیر دو زوج نیروی قوی بررسی و تاثیر عوامل گوناگون بر بازیابی موفقیت‌آمیز زیررخدادها تحلیل می‌شود.

## ۲ روش

براساس مبانی نظری امواج کشسان، جابه‌جایی‌های مربوط به یک چشمه نقطه‌ای در میدان دور در حوزه زمان



Z Component



Z Component

شکل ۳. همبستگی بین مولفه Z لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای (ورودی برنامه) و لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی، برای وارون‌سازی در محدوده بسامدی ۰/۱-۰/۱۱ هرترتز.

1	1.83e+18 	1.83e+18 	2.02e+18 	8.63e+17 	2.02e+18 	2.17e+18 	5.88e+17 	2.17e+18 
2.5	1.83e+18 	7.14e+17 	1.68e+18 	5.64e+17 	1.68e+18 	1.75e+18 	2.80e+17 	1.75e+18 
5	1.83e+18 	3.66e+17 	1.71e+18 	3.04e+17 	1.71e+18 	1.73e+18 	1.21e+17 	1.73e+18 
10	1.83e+18 	7.14e+16 	1.74e+18 	1.98e+17 	1.74e+18 	1.72e+18 	1.82e+17 	1.72e+18 
20	1.83e+18 	9.15e+16 	1.75e+18 	1.85e+17 	1.75e+18 	1.74e+18 	2.21e+17 	1.74e+18 
50	1.83e+18 	3.66e+16 	1.75e+18 	1.85e+17 	1.75e+18 	1.75e+18 	2.15e+17 	1.75e+18 
100	1.83e+18 	1.83e+16 	1.75e+18 	1.87e+17 	1.75e+18 	1.76e+18 	2.10e+17 	1.76e+18 
M1/ M2	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

































شکل ۴. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، نسبت گشتاورهای لرزه‌ای دو زیررخداد نسبت به همدیگر آورده شده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زیرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

زیاد می‌تواند شامل چند زیررخداد با فواصل مکانی و زمانی کم باشد، شناخت این موضوع نیازمند بررسی دقیق‌تر با استفاده از لرزه‌نگاشت مصنوعی و تحلیل آن است. در این تحقیق لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از مجموعه نرم‌افزاری CPS تولید و لرزه‌نگاشت حاصل از زمین‌لرزه اصلی و زیررخداد آن با همدیگر جمع و لرزه‌نگاشت حاصل، مبنای کار واقع شده است.

لرزه‌نگاشت مصنوعی به‌دست آمده تحلیل شد و عملیات وارون‌سازی انجام پذیرفت. در نرم‌افزار ایزولا برگردان خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان برای داده‌های ناحیه‌ای صورت می‌گیرد. شکل کامل موج پس از تصحیح دستگاهی بدون جدا کردن گروه یا فاز خاصی در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. با محاسبه تابع گرین به روش عدد موج گسسته بوشن (۱۹۸۱)، مولفه‌های تانسور

کیلومتر و گشتاور رویداد اول  $1.83 \times 10^{18}$  نیوتن-متر و گشتاور رویداد دوم  $7.14 \times 10^{17}$  نیوتن-متر در نظر گرفته شده است (گشتاور رویداد اول تقریباً  $2/5$  برابر گشتاور رویداد دوم است). سازوکارهای کاملاً متفاوت به‌صورت دو زوج نیروی خالص در رخداد اصلی با امتداد ۲۱۱، شیب ۸۰ و زاویه لغزش ۱۲۲ و در زیررخداد دوم با امتداد ۲۹۰، شیب ۷۶ و زاویه لغزش ۸۸- به کار رفته است (جدول ۲). مجموع این دو زیررخداد یک رخداد با درصد دو زوج نیروی ۳۸ درصد است که با استفاده از روش مجموع تانسوری به‌دست آمد. برای تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی از فاصله نمونه‌ای  $dt = 0.25$  ثانیه استفاده شد.

به علت اهمیت نحوه گسیخت در یک زمین‌لرزه و بررسی اینکه یک رخداد با درصد غیر دو زوج نیروی

2 Layers								
4 layers								
5 Layers								
8 Layers								
Crustal Model	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۵. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، تعداد لایه‌های مدل پوسته‌ای که در عملیات وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، آورده شده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زیرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

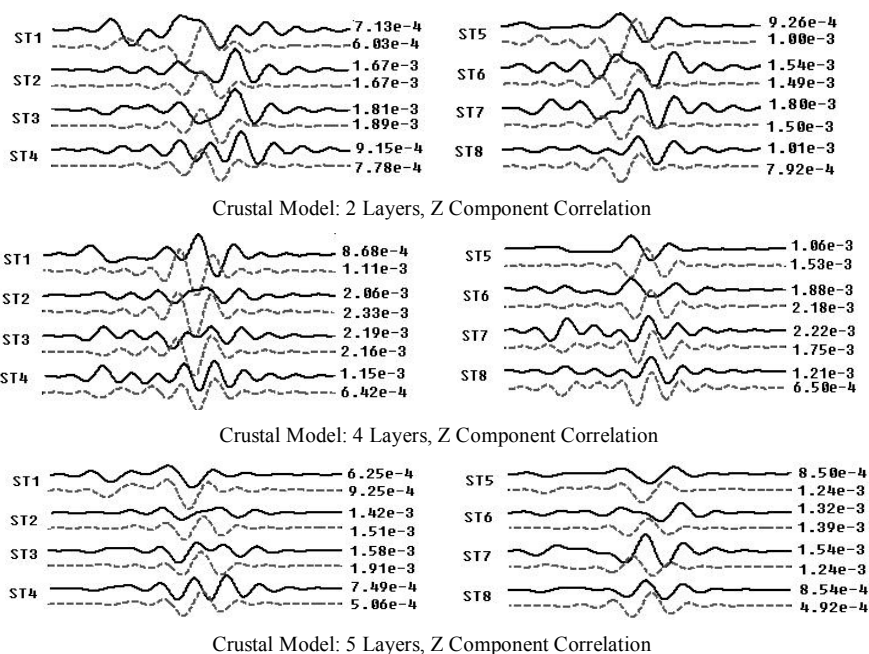
(DC1+DC2)، حالت انحرافی به صورت دو رخداد (DEV1) و (DEV2) و در نهایت، حالت انحرافی به صورت یک رخداد (DEV1+DEV2) انجام شد. با توجه به اینکه وارون‌سازی می‌تواند متأثر از نوار بسامدی، گشتاور لرزه‌ای، مدل پوسته‌ای و پراکندگی ایستگاهی و نوفه باشد، تاثیر این پارامترها در وارون‌سازی بررسی شد.

گشتاور محاسبه می‌شود و با استفاده از بردارهای ویژه تانسور گشتاور، امتداد، شیب و زاویه لغزش زمین‌لرزه به دست می‌آید. عملیات وارون‌سازی به ترتیب برای حالت‌های دو زوج نیروی محض به صورت دو رخداد (DC1) و (DC2)، دوزوج نیروی محض به صورت یک رخداد

جدول ۳. مقایسه نتایج وارون‌سازی در حالت انحرافی و دو زوج نیروی محض با دو زیررخداد برای نوار بسامدی بهینه (۰/۱۱-۰/۱ هرتز).

Frequency Band = 0.01-0.11 (Hz)

Str1, Dip1, Rak1 (°)	Str2, Dip2, Rak2 (°)	Dislocation, Str, Dip(km)	Time shift (s)	Mag	%DC	Var. red
Double couple constrained Solution						
211, 80, 125	315, 36, 17	+3, -6	-1.35	1.68e+18	90.2	0.93
303, 76, -81	90, 17, -122	0, +6	-0.30	5.64e+17	98.2	0.99
Sum of Sub1 and Sub2 (DC1+DC2)						
211, 80, 125	315, 36, 17	+3, -6	-1.35	1.68e+18	90.2	0.93
Deviatoric solution						
210, 85, 125	306, 36, 8	0, -3	-1.20	1.75e+18	38.9	0.98
266, 83, -99	139, 12, -38	0, 0	+1.8	2.79e+17	83.8	0.99
Sum of Sub1 and Sub2 (Dev1+Dev2)						
210, 85, 125	306, 36, 8	0, -3	-1.20	1.75e+18	38.9	0.98



شکل ۶. همبستگی مربوط به مولفه‌های Z لرزه‌نگاشت‌های ورودی و مصنوعی، در عملیات وارون‌سازی با به‌کارگیری مدل‌های سرعتی متفاوت.

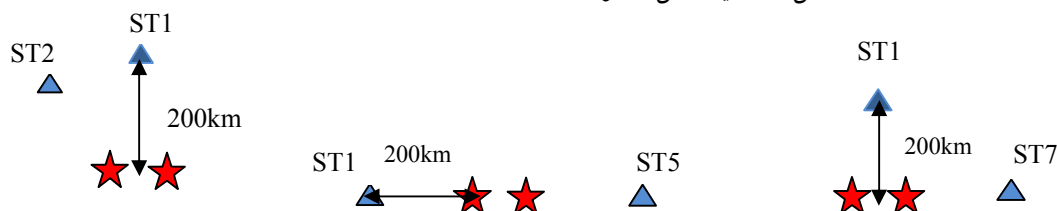
گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی محض نمایش داده شده است. به‌ترتیب از چپ به راست، سازوکار (beach balls) دو چشمه ۱۰۰٪ دو زوج نیرو، که با S1 و S2 نشان داده شده‌است و در هنگام تولید لرزه‌نگاشت‌ها با همدیگر جمع شده‌اند، دو زیررخداد به‌دست آمده از وارون‌سازی در حالت دو زوج نیروی مقید شده (DC1, DC2)، نتیجه حاصل از وارون‌سازی برای مجموع دو زیررخداد (DC1+DC2)، دو زیررخداد به‌دست آمده

### ۳ بحث

#### (الف) بررسی تاثیر نوار بسامدی در وارون‌سازی

##### چشمه پیچیده

بسامد گوشه مربوط به فاز P و S در لرزه‌نگاشت‌های تولیدی به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۱۴ هرترز بود. با توجه به این مسئله به‌منظور بررسی تاثیر نوار بسامدی، در عملیات وارون‌سازی از محدوده‌های بسامدی کوچک‌تر از بسامد گوشه و با گستره‌های متفاوت (۰/۰۱-۰/۰۴ و ۰/۰۳-۰/۰۶ هرترز و ...) استفاده شد که نتایج حاصل در شکل ۲ و جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۲، مقایسه حل تانسور



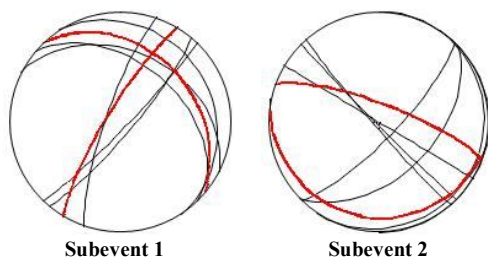
شکل ۷. نمایش یک چشمه دو نقطه‌ای (ستاره‌های سرخ‌رنگ نشان‌دهنده مکان زیررخدادها هستند) و دو ایستگاه (مثلث‌های آبی) با توزیع‌های متفاوت.



1,2	1.83e+18	7.14e+17	1.52e+18	3.69e+17	1.52e+18	1.70e+18	1.76e+17	1.70e+18
1,5	1.83e+18	7.14e+17	1.17e+18	3.89e+17	1.17e+18	1.80e+18	2.76e+17	1.80e+18
1,7	1.83e+18	7.14e+17	1.49e+18	6.34e+17	1.49e+18	1.70e+18	1.82e+17	1.70e+18
Station .No	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۸ مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، شماره ایستگاه‌های مورد استفاده در وارون‌سازی آمده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زیرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

با کاهش واریانس سنجیده می‌شود. در شکل ۳ میزان همبستگی بین لرزه‌نگاشت‌های ورودی (پس از اعمال فیلتر مناسب) و لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی هنگام به کار بردن نوار بسامدی ۰/۱۱-۰/۰۱ هرگز نشان داده شده است.



شکل ۹. سازوکار به دست آمده برای زیررخداد ۱ (سمت چپ)، و زیررخداد ۲ (سمت راست). با توجه به این شکل عدم قطعیت مربوط به بازیابی هر دو زیررخداد به خوبی قابل مشاهده است. سازوکار مربوط به زیررخدادهای اولیه با خطوط سرخ‌رنگ در شکل نشان داده شده است.

#### ب) بررسی تاثیر گشتاور لرزه‌ای ( $M_0$ ) زمین‌لرزه در وارون‌سازی چشمه پیچیده

با انتخاب نوار بسامدی بهینه در عملیات وارون‌سازی (۰/۱۱-۰/۰۱ هرگز) در مرحله بعد تاثیر نسبت گشتاور لرزه‌ای زیررخدادها در وارون‌سازی چشمه پیچیده مورد بررسی قرار گرفت. همانند مرحله قبل به تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی اما با نسبت‌های گشتاور متفاوت پرداخته شد. نتایج حاصل از وارون‌سازی در شکل ۴

از وارون‌سازی در حالت انحرافی ( $DEV1, DEV2$ ) و نتیجه به دست آمده از وارون‌سازی در حالت انحرافی با در نظر گرفتن یک رخداد ( $DEV1+DEV2$ ) نمایش داده شده است. ارقام درج شده روی هر سازوکار کانونی، گشتاور لرزه‌ای به دست آمده در وارون‌سازی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود، بازیابی سازوکار مربوط به هر دو زیررخداد در حالتی که از نوار بسامدی شامل گستره وسیع‌تری از بسامدهای پایین‌تر از بسامد گوشه، استفاده شود با قابلیت اطمینان بیشتری میسر است (ستون پنجم).

در بررسی نوار بسامدی مشاهده می‌شود که نوارهای بسامدی گسترده‌تر (۰/۱۱-۰/۰۱ هرگز) و شامل بسامدهای بزرگ‌تر، توانایی بیشتری در بازیابی تانسور گشتاور به طور کامل دارند. با توجه به نتایج جدول ۳ ملاحظه می‌شود که در وارون‌سازی در حالت انحرافی (حالت بهینه) با دو زیررخداد و در نوار بسامدی گسترده‌تر (۰/۱۱-۰/۰۱ هرگز)، فاصله مکانی (۳ کیلومتر) بین دو زیررخداد به خوبی تشخیص داده شده است، این در حالی است که امکان بازیابی تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۲ برای وارون‌سازی در حالت انحرافی میسر نیست. برازش بین داده‌های ورودی (لرزه‌نگاشت‌های تولید شده به روش عدد موج) و لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در نرم‌افزار ایزولا

این امر را می‌توان به این صورت توضیح داد که با افزایش نسبت گشتاورهای دو زیررخداد، شکل موج حاصل از زیررخداد بزرگ‌تر روی لرزه‌نگاشت حاصل غالب می‌شود و این مسئله موجب می‌شود تا احتمال تشخیص صحیح سازوکار مربوط به زیررخداد ۲ پایین بیاید. در حالتی که گشتاور لرزه‌ای هر دو زیررخداد با هم یکسان است، تشخیص سازوکار هیچ‌کدام از زیررخدادها امکان پذیر نیست. از این رو تاثیر نسبت گشتاور لرزه‌ای بین دو زیررخداد در عملیات وارون‌سازی قابل انکار نیست.

**ج) تاثیر مدل سرعتی در وارون‌سازی چشمه پیچیده**  
در این بخش تاثیر مدل سرعتی روی عملیات وارون‌سازی یک چشمه پیچیده (شامل دو زیررخداد) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی از مدل پوسته با مشخصات درج شده در جدول ۱ استفاده شده است. برای نمایش تاثیر مدل پوسته‌ای در عملیات وارون‌سازی مدل‌های پوسته‌ای ۲ لایه، ۴ لایه، ۵ لایه و ۸ لایه و نوار بسامدی بهینه (۰/۱۱-۰/۱-هرتز) به کار رفته است. نتایج حاصل در شکل ۵ درج شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که در همه موارد سازوکار کانونی مربوط به هر دو زیررخداد قابل بازیابی نیست. در شکل ۶ همبستگی بین لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و مصنوعی نشان داده شده است. در اینجا لرزه‌نگاشت‌های تولید شده

نمایش داده شده‌اند. در این شکل، در ستون اول، نسبت گشتاورهای مربوط به دو زیررخداد آورده شده است.

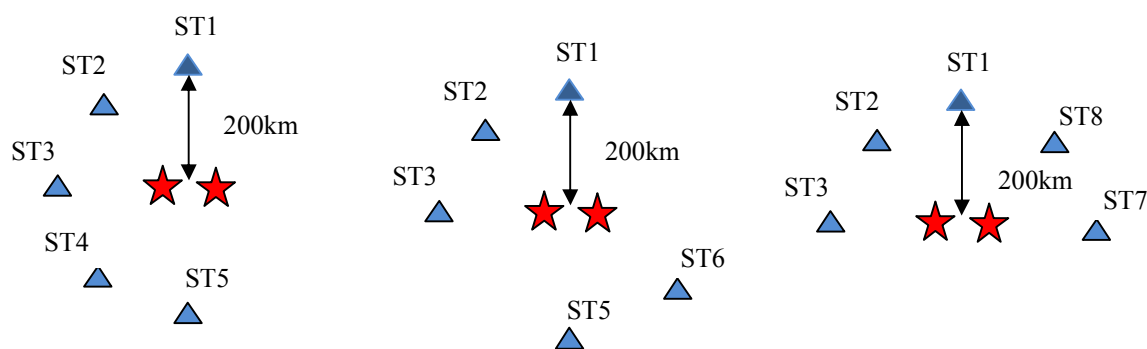
جدول ۴. مشخصات مدل‌های سرعتی به کار گرفته شده در وارون‌سازی.

Depth of layer top (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Rho (g/cm**3)
0	6.2	3.57	2.8
3.6	8.0	4.70	2.3

Depth of layer top (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Rho (g/cm**3)
0	5.8	3.46	2.449
20	6.5	3.84	2.7142
35	8.04	4.48	3.2976
67.5	8.05	4.49	3.2994

Depth of layer top (km)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Rho (g/cm**3)
0	5.4	3.103	2.78
2	5.7	3.275	2.84
8	6.0	3.448	2.90
12	6.3	3.620	2.96
35	8.0	4.597	3.30

با توجه به شکل ۴ همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت گشتاورهای لرزه‌ای به نظر می‌رسد که هرچه قدر این نسبت بزرگ‌تر شود (تقریباً در حالتی که نسبت گشتاور بین دو زیررخداد ۱۰ و بیشتر است)، تشخیص زیررخداد ۲ مشکل‌تر می‌شود و امکان بازیابی تانسور گشتاور مربوط به این زیررخداد میسر نیست. علت

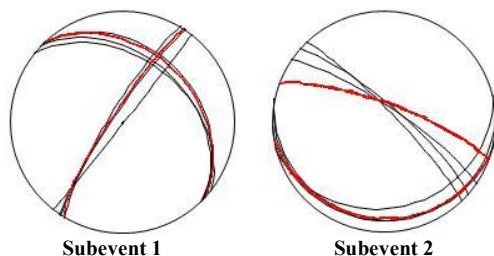


شکل ۱۰. انواع چیدمان یک چشمه دو نقطه‌ای و ۵ ایستگاه.

1,2,3, 4,5								
1,2,3 .5,6								
1,2,3 .7,8								
Station. No	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۱۱. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، شماره ایستگاه‌هایی مورد استفاده در وارون‌سازی آمده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زبرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

۱ - استفاده از دو ایستگاه با توزیع‌های متفاوت: در ابتدا با توجه به شکل ۷، از داده‌های مربوط به دو ایستگاه با سه توزیع متفاوت استفاده شد. در مورد چیدمان‌های گوناگون، میزان بک آزیموت از ۹۰ درجه تا تقریباً ۳۶۰ درجه تغییر می‌کرد. نتایج به‌دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، امکان بازیابی تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۲ با به کارگیری فقط دو ایستگاه وجود ندارد. هنگامی که از دو ایستگاه استفاده می‌شود، در هر مورد سازوکار به‌دست آمده برای زیررخداد ۱ و ۲، با توجه به توزیع‌های ایستگاهی متفاوت، در شکل ۹ نشان داده شده است (سازوکار مربوط به زیررخداد ۱ و ۲ برای مقایسه، با رنگ سرخ روی شکل مشخص شده است). تحت این شرایط ذاتاً نمی‌توان انتظار داشت که تغییری از یک مسیر چشمه-



شکل ۱۲. سازوکارهای به‌دست آمده برای دو زیررخداد در عملیات وارون‌سازی در حالت دو زوج نیروی مقید شده. با در نظر گرفتن ۵ ایستگاه با توزیع‌های متفاوت.

با استفاده از مجموعه نرم‌افزاری CPS به‌منزله لرزه‌نگاشت‌های مشاهده‌ای و لرزه‌نگاشت‌های تولید شده با نرم‌افزار ایزولا درحکم لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به شکل ۶ به خوبی مشاهده می‌شود که با تغییر مدل پوسته‌ای در عملیات وارون‌سازی، میزان همبستگی بین لرزه‌نگاشت‌ها کاهش می‌یابد. در این بخش با توجه به این مسئله که امکان بازیابی هر دو زیررخداد هنگام اجرای عملیات وارون‌سازی با مدل سرعتی متفاوت از مدل به کار گرفته شده هنگام تولید لرزه‌نگاشت‌ها، میسر نیست، تاثیر مدل پوسته‌ای در عملیات وارون‌سازی قابل مشاهده است.

(د) تاثیر تعداد ایستگاه‌ها و توزیع ایستگاهی در وارون‌سازی چشمه پیچیده

در مرحله بعد از بررسی عوامل موثر بر عملیات وارون‌سازی چشمه پیچیده مربوط به یک زمین‌لرزه، با به کارگیری داده‌های مربوط به دو ایستگاه، سه ایستگاه، چهار ایستگاه و پنج ایستگاه با توزیع‌های متفاوت، تاثیر تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در عملیات وارون‌سازی و همچنین توزیع ایستگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور خلاصه در این بخش نتایج حاصل از استفاده از ۲ ایستگاه و ۵ ایستگاه آورده شده است.

سازوکار به دست آمده برای هر دو زیررخداد با در نظر گرفتن سه دسته داده متفاوت، و نیز سازوکار مربوط به زیررخدادهای اولیه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

با توجه به اینکه در این بخش، هر دو زیررخداد ۱ و ۲ با موفقیت بازیابی شدند، چیدمان‌های دیگر از ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار نگرفت. به طور خلاصه، از مباحث این بررسی‌ها، تاثیر تعداد ایستگاه‌های به کار گرفته شده در وارون‌سازی و نحوه توزیع آنها، نتیجه می‌شود. به این ترتیب که با افزایش تعداد ایستگاه‌ها و توزیع بهتر و مناسب‌تر در اطراف چشمه، امکان بازیابی موفقیت‌آمیز دو زیررخداد بیشتر می‌شود.

#### ۵) بررسی تاثیر استفاده از تعداد مولفه‌ها در وارون‌سازی یک چشمه پیچیده

در این قسمت با به کارگیری تعداد مولفه‌های متفاوت از لرزه‌نگاشت‌ها، تاثیر استفاده از یک و دو مولفه روی نتایج حاصل از وارون‌سازی یک چشمه پیچیده مورد بررسی

ایستگاه به دیگری بازتاب یابد. به این ترتیب تغییر جواب حاصل از حذف یا اضافه کردن یک ایستگاه ممکن است چشمگیر باشد. از طرف دیگر، با تعداد کم ایستگاه‌ها نمی‌توان یک مجموعه داده با فراوانی زیاد برای ایجاد توزیع آماری پارامترها به وجود آورد. از این رو با تعداد کمی ایستگاه، پایداری در جواب به دست آمده برای زیررخداد ۲ ملاحظه نمی‌شود.

۲- استفاده از ۵ ایستگاه با توزیع‌های متفاوت: تا این مرحله از بررسی تعداد و توزیع ایستگاه‌های به کار گرفته شده در وارون‌سازی (۲، ۳ و ۴ ایستگاه)، بازیابی تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۲ به خوبی میسر نبود. در نهایت، با به کار بردن ۵ ایستگاه با سه توزیع متفاوت (شکل ۱۰)، امکان بازیابی زیررخدادها بررسی شد در شکل ۱۱ نتایج به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های مربوط به ۵ ایستگاه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در وارون‌سازی برای حالت دو زوج نیروی مقید شده، براساس چیدمان‌های متفاوت، هر دو زیررخداد با موفقیت بازیابی شده‌اند. در این مرحله میزان گپ آزیموتی به مراتب نسبت به حالت‌های قبل، کمتر بود.

z	1.83e+18	7.14e+17	1.59e+18	4.89e+17	1.59e+18	1.78e+18	2.70e+17	1.78e+18
N	1.83e+18	7.14e+17	1.43e+18	5.53e+17	1.43e+18	1.75e+18	2.47e+17	1.75e+18
N, Z	1.83e+18	7.14e+17	1.65e+18	5.73e+17	1.65e+18	1.75e+18	2.72e+17	1.75e+18
N, E, Z	1.83e+18	7.14e+17	1.68e+18	5.64e+17	1.68e+18	1.75e+18	2.80e+17	1.75e+18
Component	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۱۳. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، مولفه‌های به کار رفته در عملیات وارون‌سازی آورده شده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زیرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

10% White	1.83e+18	7.14e+17	1.65e+18	2.06e+18	1.65e+18	1.68e+18	2.04e+18	1.68e+18
50% White	1.83e+18	7.14e+17	9.06e+18	1.06e+19	9.06e+18	9.06e+18	1.06e+19	9.06e+18
10% Gaussian	1.83e+18	7.14e+17	1.95e+18	5.23e+17	1.95e+18	1.80e+18	4.08e+17	1.80e+18
50% Gaussian	1.83e+18	7.14e+17	2.53e+18	8.96e+17	2.53e+18	2.86e+18	8.95e+17	2.86e+18
Noise	S1	S2	DC1	DC2	DC1+DC2	DEV1	DEV2	DEV1+DEV2

شکل ۱۴. مقایسه حل تانسور گشتاور برای حالت‌های انحرافی و دو زوج نیروی مقید شده. در ستون اول از سمت چپ، میزان نوفه افزوده شده به لرزه‌نگاشت‌های اولیه نوشته شده است. ستون‌های ۲ تا ۸ به ترتیب نشان‌دهنده زیرنویس‌های ذکر شده در شکل ۲ هستند.

۵۰٪ نوفه سفید و زنگوله‌ای به لرزه‌نگاشت اولیه حاصل از جمع زدن لرزه‌نگاشت‌های مربوط به دو زیررخداد، تاثیر میزان نوفه افزایشی در نتایج وارون‌سازی یک چشمه پیچیده مورد بررسی قرار گرفت (برای افزودن نوفه به لرزه‌نگاشت‌های اولیه، از برنامه ذکر شده در ضمیمه آ تحت نرم‌افزار مت‌کب استفاده شده است).

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۴، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، میزان نوفه افزایشی به لرزه‌نگاشت‌های اولیه، تاثیر بسیار زیادی نه فقط در بازیابی تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۲ بلکه روی بازیابی سازوکار مربوط به زیررخداد ۲ نیز دارد. در حالتی که ۱۰٪ نوفه سفید به لرزه‌نگاشت اولیه افزوده شده است، تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۱ به خوبی بازیابی شده است، اما زیررخداد ۲ به دست نیامده است. لیکن در حالتی که ۱۰٪ نوفه زنگوله‌ای افزوده شده است، تقریباً هر دو زیررخداد بازیابی شده‌اند. در نهایت در حالتی که ۵۰٪ نوفه (هم سفید و هم گوسی) به لرزه‌نگاشت اولیه اضافه شده است، تقریباً هیچ کدام از زیررخدادها به طور کامل بازیابی نشده‌اند. از این رو میزان نوفه افزایشی در بازیابی

قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که هنگام استفاده از مولفه قائم با توجه به اینکه بیشترین میزان انرژی روی این مولفه بود، با به کار بردن فقط این مولفه هر دو زیررخداد با موفقیت بازیابی می‌شوند اما با به کار بردن مولفه‌های دیگر، تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد ۲ به خوبی بازیابی نخواهد شد. از این رو بایستی به میزان انرژی روی مولفه به کار رفته در عملیات وارون‌سازی توجه شود تا بتوان با قابلیت اطمینان بیشتری به نتایج به دست آمده اکتفا کرد.

#### و) بررسی تاثیر نوفه

در این بخش، به منظور بررسی توانایی روش ایزولا در بررسی پیچیدگی چشمه یک زمین‌لرزه در حضور نوفه، یک دسته آزمایش براساس چیدمان شکل ۱ صورت گرفت. در این تحقیق فرض این بود که همه پارامترهای تاثیرگذار دیگر، کاملاً به صورت بهینه در وارون‌سازی به کار رفته‌اند. به بیان دیگر برای بررسی تاثیر نوفه، تابع‌های گرین، ساختار کامل، نوار بسامدی بهینه و پوشش ایستگاهی مناسب، اما لرزه‌نگاشت‌هایی با افزودن نوفه در وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. با افزودن ۱۰٪ و

تانسور گشتاور مربوط به زیررخداد‌های یک زمین‌لرزه پیچیده بسیار تاثیر گذار است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در حال حاضر، انحراف‌های کوچک از مدل گسلش بُرشی محض (DC) تقریباً برای همه زلزله‌هایی که به طور معمول با استفاده از داده‌های کیفیت بالای شبکه‌های زلزله‌سنج جهانی بررسی می‌شوند، دیده می‌شود. این مولفه‌های non-DC احتمالاً محصول داده‌های نوفه‌ای یا روش‌های ناقص مدل‌سازی است و بسیاری از آنها نیز به‌خوبی حل می‌شوند. این انحراف‌ها باید از مدل‌های گسلش آرمانی مانند پیچش گسل‌ها و یا مولفه‌های نرمال حرکت برای سطوح گسل تشخیص داده شوند. پیشرفت در تحقیق سازوکار زلزله‌ها، و به‌ویژه مولفه non-DC می‌تواند نقشی مهم در روشن ساختن عامل‌هایی مانند پیچیدگی هندسی گسل، شکست کششی، اتساع و جریان‌های شاره در گسلش‌ها داشته باشند.

به علت اهمیت نحوه گسیخت در یک زمین‌لرزه و بررسی اینکه یک رخداد با درصد غیر دو زوج نیروی زیاد می‌تواند شامل چند زیررخداد با فواصل مکانی و زمانی کم باشد، در این تحقیق سعی بر این بود که تا حد امکان، عوامل تاثیرگذار بر وارون‌سازی یک چشمه پیچیده (مشکل از چند زیررخداد) بررسی شود. به‌منظور بررسی این موضوع، لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از مجموعه نرم‌افزاری CPS تولید و لرزه‌نگاشت حاصل از زمین‌لرزه اصلی و زیررخداد آن با همدیگر جمع و لرزه‌نگاشت حاصل مبنای کار واقع شده است. در واقع با مدل‌سازی یک چشمه با درصد غیر دو زوج نیروی زیاد (حاصل جمع دو زیررخداد ۱۰۰ درصد دو زوج نیرو)، توانایی روش ISOLA برای تشخیص دو زیررخداد با سازوکارهای متفاوت و عوامل موثر بر این تشخیص تحلیل شد.

به‌طور خلاصه، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تاثیر نوار بسامدی، مدل پوسته‌ای، نسبت گشتاور زیررخداد‌ها، و میزان نوفه افزایشی در بازیابی موفقیت‌آمیز رخداد اصلی و زیررخداد‌های آن بسیار چشمگیر است. تاثیر مولفه به کار رفته در عملیات وارون‌سازی و پوشش ایستگاهی نیز قابل‌اغماض نبود، هرچند تا حدودی می‌توان با انتخاب نوار بسامدی مناسب، تاثیر پوشش ایستگاهی را به حداقل رساند. هنگام کار کردن با داده‌های واقعی بهتر است سعی شود که تا حد امکان با انتخاب مدل سرعتی بهینه، بهترین پوشش ایستگاهی و نوار بسامدی بهینه، تاثیر پارامترهای موثر را به حداقل رساند تا بتوان به نتایج قابل‌قبولی دست یافت.

#### منابع

- Aki, K., 1968, Seismic displacement near a fault: *J. Geophys. Res.*, **73**, 5359-5376.
- Aki, K., and Richards, P. G., 2002, *Quantitative Seismology Theory and Methods: Second Ed.*, University Science Book.
- Haskell, N. A., 1969, Elastic displacements in the near-field of a propagating fault: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 865-908.
- Herrmann, R. B., 2002, *Computer Programs in Seismology*  
<http://www.eas.slu.edu/eqc/eqccps.html>.
- Imamura, A., 1937, *Theoretical and Applied Seismology*: Maruzen, Tokyo, 358 pp.
- Kanamori, H., 1972, Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting, the Tottori earthquake of 1943: *Phys. Earth planet, Interiors* **5**, 426-434.
- Kanamori, H., and Stewart, G. S., 1978, Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976: *J. Geophys Res.*, **83**, 3427-3434.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H., 1982, Inversion of complex body waves: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**(2), 491-506.
- Kikuchi, M., and Kanamori, H., 1991, Inversion of complex body waves -III, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 2335-2350.
- Burdick, L. J., and Melman, G. R., 1976, Inversion of the body waves from the Borrego mountain earthquake to the source

- Wyss, M., and Brune, J. N., 1967, The Alaska earthquake of 28 March 1964: a complex multiple rupture: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **57**, 1017-1023.
- Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., and Tselentis, G.-A., 2005, Iterative deconvolution of regional waveforms and double-event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 159–172.
- Zahradnik, J., Sokos, E., Tselentis, G.-A., and Martakis, N., 2007, Non-double-couple mechanism of moderate earthquakes near Zakynthos, Greece, April 2006: Explanation in terms of complexity: *Geophysical Prospecting* **56**, 341–356.
- mechanism, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**, 1485-1499.
- Bouchon, M., 1981, A simple method to calculate Green's function for elastic layered media: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**(4), 959-971.
- Fukao, Y., 1972, Source process of the large deep-focus earthquake and its tectonic implication- The western Brazil earthquake of 1963: *Phys. Earth planet, Interiors* **5**, 61-76.
- Miyamura, S., Omoto, S., Teisseyra, R., and Vesanen, E., 1964, Multiple shocks and earthquakes series pattern: *Int. Inst. Seismol. Earthquake Eng. Bull* **2**, 71-92.
- Rial, J. A., 1978, The Caracas, Venezuela, earthquake of July 1967: a multiple-source event: *J. Geophys. Res.*, **83**, 5405-5414.