

بررسی روش برگردان نسبی تانسور گشتاور لرزه‌ای با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی

شده و کاربرد آن در پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب $M_W=6.0$ علی رضایی نایه^۱، ظاهر حسین شومالی^{۱*} و محمدرضا حاتمی^۱^۱موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۸)

چکیده

برگردان نسبی تانسور گشتاور لرزه‌ای روش سریع و مناسبی برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌هایی است که نزدیک به هم رخ می‌دهند و در ایستگاه‌های مشترکی ثبت شده‌اند. در این روش با استفاده از اندازه‌گیری نسبی دامنه یک فاز خاص ناشی از چندین زمین‌لرزه‌ای که نزدیک به هم رخ داده‌اند و در ایستگاه‌های مشترک ثبت شده‌اند می‌توان با داشتن سازوکار زمین‌لرزه مرجع، بدون دانستن تابع گرین کامل سازوکار زمین‌لرزه‌های دیگر را به دست آورد. در این تحقیق سعی شد تا با تولید داده‌های مصنوعی تحت شرایط متفاوت و برگردان آنها به روش نسبی، تاثیر عوامل گوناگون همچون مقدار درصد CLVD (مقدار سهم مولفه غیر دوزوج نیرو) و همچنین تاثیر مدل سرعتی پوسته در نتیجه برگردان نسبی بررسی شود. مکان زمین‌لرزه‌هایی که در این تحقیق شبیه‌سازی شده‌اند مطابق با مکان زمین‌لرزه ۲۵ مارس ۲۰۰۶ منطقه فین و ۱۳ پس‌لرزه آن است که با استفاده از شبکه نوار پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (INSN) ثبت شده‌اند. بزرگی این زمین‌لرزه‌ها برحسب M_L بین ۳/۵ تا ۵/۶ متغیر است. در این تحقیق چهار سری داده مصنوعی برای این ۱۴ رخداد تولید شده است که تفاوت آنها در مقدار درصد دوزوج نیرو و همچنین مدل پوسته‌ای مورد استفاده است. با عمل برگردان برای این چهار سری داده مصنوعی این نتیجه حاصل شد که روش برگردان نسبی تانسور گشتاور برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌هایی که در مقیاس محلی نزدیک به هم رخ داده‌اند (زمین‌لرزه‌های خوشه‌ای) مناسب است، همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش غیرمنطقی و بیش‌ازحد مؤلفه غیر دوزوج نیرو در داده‌ها، باعث بروز خطا در این روش می‌شود؛ باین‌حال تغییر نوع مدل پوسته‌ای به کار رفته در تولید داده‌ها، باعث به‌دست آمدن خطای قابل‌ملاحظه‌ای نمی‌شود و اثر مدل پوسته‌ای در برگردان نسبی کمینه می‌شود. با کمک این روش، سازوکار پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب تعیین شده است. سازوکارهای به‌دست آمده با روند کلی زمین‌لرزه اصلی تطابق دارند.

واژه‌های کلیدی: برگردان نسبی تانسور گشتاور، زمین‌لرزه‌های خوشه‌ای، زمین‌لرزه فاریاب، درصد دوزوج نیرو، لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی

Relative moment tensor inversion method using synthetic data and its application to the aftershocks of the Faryab Earthquake on February 28, 2006 ($M_W 6.0$)

Ali Rezaei Nayeh¹, Zaher Hossein Shomali^{1*} and Mohammad Reza Hatami¹¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 4 December 2011, accepted: 18 December 2012)

*Corresponding author:

shomali@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

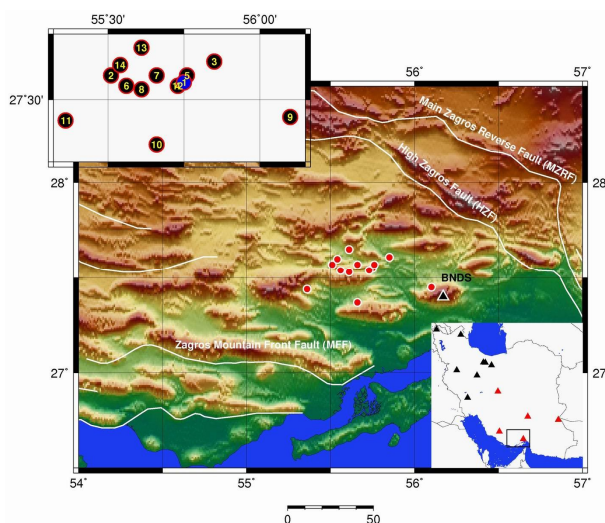
Relative Moment Tensor Inversion, RMTI, method is a suitable method to determine the focal mechanism of some close-lying earthquakes (a cluster of earthquakes) recorded by common seismic stations. With enough data on the propagation path, a Green's function is needed in classical source studies. However, the effect of the propagation path is minimized in RMTI applications using relative data. The observed data in an RMTI method consists of the relative amplitudes of the direct P phase and direct S phase on vertical and rotated horizontal components of some close-lying earthquakes recorded by common seismic stations. The effect of the propagation paths from the source-region to a given seismic station is minimized using the relative amplitudes of the corresponding phases (e.g. P-phase) at a given station. The focal mechanisms of the earthquakes are then determined using a linear weighted least-squares approach for the six components of the seismic moment tensor without knowing the complete Green's functions. The calculation is done using only a simple velocity model at the source region. In this research, we have implemented the RMTI method for four groups of synthetic data. Each group consists of 14 events that their corresponding locations and focal-mechanisms are taken according to the events of March 25, 2006 occurred in the Fin region, South of Iran. These events were recorded by Iranian National Broad-Band Seismic Network (INSN) in local distances and their magnitudes (M_L) vary between 3.5 and 5.6. In this synthetic data-set, we tried to analyze the effect of a velocity-model and also non-double couple components (CLVD) in the moment tensor inversion using different scenarios. The synthetic data were firstly inverted using a classical moment tensor inversion in a time domain and then were inverted using the RMTI method in both time and frequency domains. The effects of the velocity model and CLVD components in the data were then analyzed using the synthetic data at different frequency bands used in the inverse algorithm. Our results indicate that the RMTI method can be easily implemented to retrieve the focal mechanism of close-lying earthquakes in local distances. Our results also indicate that an unrealistic increase of non-double-couple components causes wrong results, but the crustal model does not cause any significant effect and the effect of the propagation path in a relative inversion is minimized. The aftershock focal mechanisms of the February 28, 2006 earthquake were determined using an RMTI method. The focal mechanisms of the aftershocks were consistent with main shock.

Key words: Clustered earthquakes, double-couple percentage, Faryab Earthquake, relative moment tensor inversion, synthetic seismograms

۱ مقدمه

تعیین سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها براساس روش‌های متعددی مانند استفاده از قطبش موج P و مدل‌سازی شکل موج صورت می‌گیرد (لنگستون و هلمبرگر، ۱۹۷۵). روش دیگر مورد استفاده برای این منظور، برگردان تانسور گشتاور لرزه‌ای است. در حالت کلی می‌توان برگردان تانسور گشتاور لرزه‌ای را به دو حالت عملی ساخت. حالت اول با استفاده از روش‌های مطلق (روش‌های

کلاسیک) صورت می‌گیرد، در بین روش‌های مطلق اولین تلاش‌ها برای تعیین تانسور گشتاور لرزه‌ای براساس مشاهدات نوسانات آزاد صورت پذیرفت (گیلبرت و ژیونسکی، ۱۹۷۵). روش‌های برگردان در تعیین تانسور گشتاور لرزه‌ای برای امواج سطحی در حوزه زمان و بسامد نیز به کار گرفته شده‌اند (مندیکورن ۱۹۷۷؛ کاناموری و گیون، ۱۹۸۱). مشابه با همین روش‌ها، برای امواج حجمی نیز روش‌هایی وجود دارد (استامپ و جانسون، ۱۹۷۷؛



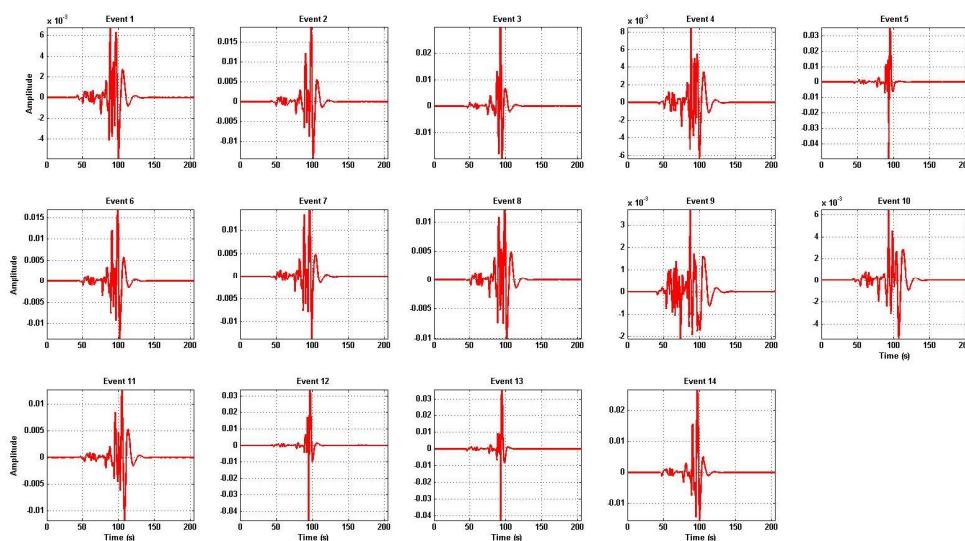
شکل ۱. موقعیت مکانی زمین‌لرزه ۲۵ مارس ۲۰۰۶ (زمین‌لرزه اصلی یا زمین‌لرزه شماره ۱) و ۱۳ پس‌لرزه آن در منطقه فین. دایره‌های سرخ‌رنگ موقعیت زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد. موقعیت ایستگاه‌های شبکه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در گوشه پایین سمت راست شکل داده شده است. (مثلث‌های سرخ ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق و مثلث‌های مشکی سایر ایستگاه‌ها هستند). در گوشه سمت چپ و بالا نمای نزدیک‌تر را از مکان زمین‌لرزه‌ها مشاهده می‌کنیم و زمین‌لرزه اصلی با دایره آبی‌رنگ مشخص شده است.

برگردان تانسور گشتاور با استفاده از روش‌های نسبی صورت می‌گیرد (داهم، ۱۹۹۶). در روش‌های نسبی برگردان تانسور گشتاور لرزه‌ای نیازی به حذف اثر دستگاهی وجود ندارد، همچنین در این روش اثر تابع گرین بین چشمه و گیرنده نیز کمینه می‌شود. در این تحقیق سعی شده است تا با داده‌های شبیه‌سازی شده، روش برگردان نسبی تانسور گشتاور بررسی و سازوکار پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب $M_W=6/0$ تعیین شود.

استرلیتز، ۱۹۷۸). یک روش رایج قابل کاربرد برای هر دو امواج سطحی و حجمی براساس استفاده از مجموع مدهای عادی است (ژیونسکی و همکاران، ۱۹۸۱). در برخی از روش‌ها از کل شکل موج برای برگردان نیز استفاده شده است (زاهرادینیک و همکاران ۲۰۰۱). نکته مشترک در بین روش‌های کلاسیک این است که بایستی از تابع گرین (Green's function) بین چشمه و گیرنده اطلاع کافی داشت، همچنین قبل از استفاده از ثبت‌های لرزه‌ای بایستی اثرات دستگاهی را از روی آنها حذف کرد. حالت دوم

جدول ۱. مشخصات زمان، مکان و بزرگی زمین‌لرزه‌ها پس از مکان‌یابی مجدد.

No.	Origin Time (YYMMDD HHMM)	Lat (deg)	Lon (deg)	Depth (km)	Magnitude (M_L)
1	060325 0728	27.55	55.75	19.59	5.6
2	060325 0856	27.57	55.51	14.46	4.8
3	060325 0953	27.61	55.85	9.87	4.3
4	060325 0955	27.54	55.73	23.05	5.2
5	060325 1000	27.57	55.76	3.94	5.3
6	060325 1022	27.54	55.56	16.05	4.8
7	060325 1102	27.57	55.66	16.18	4.9
8	060325 1116	27.53	55.61	19	4.3
9	060325 1150	27.45	56.10	34.67	3.5
10	060325 1157	27.37	55.66	25.02	3.7
11	060325 1213	27.44	55.36	15	4.9
12	060325 1458	27.54	55.73	4.17	4.5
13	060325 1748	27.65	55.61	4.53	4.3
14	060325 2123	27.60	55.54	9.51	3.8



شکل ۲. مؤلفه قائم لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی (سرعت نگاشت) فیلتر شده در بازه بسامدی ۰/۱ تا ۰/۲ هرتر برای سری اول لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در ایستگاه کرمان KRBR برای زمین‌لرزه اصلی (شماره یک) و ۱۳ پس‌لرزه آن، محور قائم دامنه و محور افقی زمان (ثانیه) است.

۲ روش تحقیق

رابطه خطی فوق بیانی از قضیه بازنمایی (representation's theorem) است و برای بررسی بسیاری از چشمه‌ها به کار می‌رود. زمانی که بتوان با تقریب خوبی چشمه را هم به صورت زمانی و هم به صورت مکانی نقطه‌ای (point-source) فرض کرد، این رابطه برای میدان جابه‌جایی دور امواج درونی با تناوب بزرگ‌تر از زمان شکستگی معتبر است. با توجه به رابطه فوق مشخص است برای ربط دادن جابه‌جایی و تانسور گشتاور نیاز به تابع گرین محیط اجتناب‌ناپذیر است و این از خصوصیات روش برگردان مطلق یا روش‌های کلاسیک تعیین پارامترهای چشمه است، به طوری که با داشتن جابه‌جایی در ایستگاه و تعیین تابع گرین محیط می‌توان به تانسور گشتاور دست پیدا کرد. در مقایسه با روش‌های کلاسیک

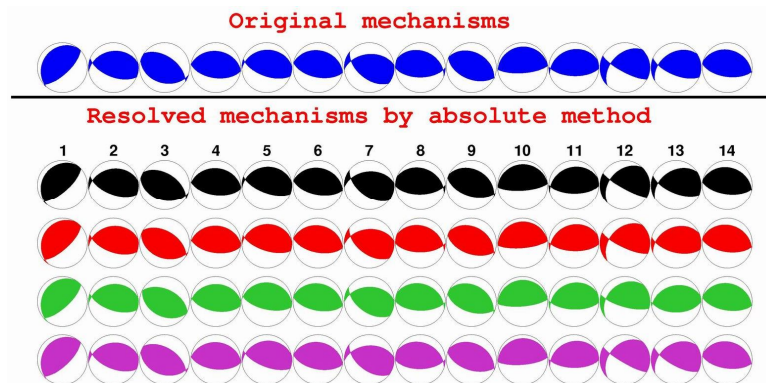
تانسور گشتاور لرزه‌ای یکی از راه‌های نشان دادن چشمه لرزه‌ای است و می‌توان با فرض نقطه‌ای بودن چشمه براساس آن یک رابطه خطی بین جابه‌جایی ایجاد شده در ایستگاه و تابع‌های گرین محیط تعریف کرد. برای طول موج‌های بسیار بلندتر از ابعاد چشمه میدان جابه‌جایی در ایستگاه (x, t) حاصل از جابه‌جایی در چشمه (ξ, τ) را می‌توان به صورت زیر نوشت (لی و والاس، ۱۹۹۵):

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

که X بردار مکان ایستگاه، t زمان و $u_n(x, t)$ مؤلفه n م جابه‌جایی است. $G_{ni,j}(X, t; \xi, \tau)$ مشتق مکانی تابع گرین را نشان می‌دهد. ξ مکان چشمه، τ زمان آنی (Impulse) سیگنال چشمه و M_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) تانسور گشتاور است که شدت و جهت دوزوج نیرو را توصیف می‌کند.

جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی برای سری‌های اول تا چهارم.

شماره سری	درصد دوزوج نیرو	مدل سرعتی استفاده شده	تعداد ایستگاه	تعداد زمین‌لرزه
سری اول	۱۰۰	IASP91	۵	۱۴
سری دوم	۵۰	IASP91	۵	۱۴
سری سوم	۲۰	IASP91	۵	۱۴
سری چهارم	۱۰۰	مدل پیچیده‌تر از IASP91	۵	۱۴



شکل ۳. نتایج حاصل از برگردان مطلق تانسور گشتاور لرزه‌ای برای زمین‌لرزه‌های شماره ۱ تا ۱۴. به ترتیب از بالا به پایین (آبی): سازوکار به کار رفته در تولید داده‌های مصنوعی، مشکی: سازوکار حاصل از برگردان سری اول (درصد دوزوج نیرو ۱۰۰ و مدل سرعتی به کار رفته IASP91 (کنت و انگدال، ۱۹۹۱))، سرخ: سازوکار حاصل از برگردان سری دوم (درصد دوزوج نیرو ۵۰ و مدل سرعتی به کار رفته IASP91)، سبز: سازوکار حاصل از برگردان سری سوم (درصد دوزوج نیرو ۲۰ و مدل سرعتی به کار رفته IASP91)، بنفش: سازوکار حاصل از برگردان سری چهارم (درصد دوزوج نیرو ۱۰۰ و مدل سرعتی به کار رفته پیچیده‌تر از IASP91 مطابق با جدول ۳).

شده‌اند عبارت $I_n(X, t; \xi, \tau)$ را می‌توان با تقریب خوبی یکسان فرض کرد و لذا با اندازه‌گیری نسبی دامنه و به دست آوردن نسبت دامنه‌ها به یک دامنه مرجع، تاثیر این قسمت کمینه می‌شود. در نتیجه قسمت عمده تاثیرگذاری در محاسبات همان عبارت اول یا $a(\theta, \varphi)$ است که با داشتن یک مدل سرعتی ساده در محل چشمه و همچنین دانستن مکان چشمه و گیرنده، قابل محاسبه است. اگر فرض شود که دو زمین‌لرزه در فاصله نزدیکی نسبت به یکدیگر رخ داده‌اند، هر دو در ایستگاه‌های مشترکی ثبت شده‌اند و همچنین تانسور گشتاور برای یکی از این دو زمین‌لرزه (زمین‌لرزه مرجع) مشخص باشد می‌توان رابطه (۳) را نوشت (داهم، ۱۹۹۶؛ شمالی و رابرت، ۲۰۰۹):

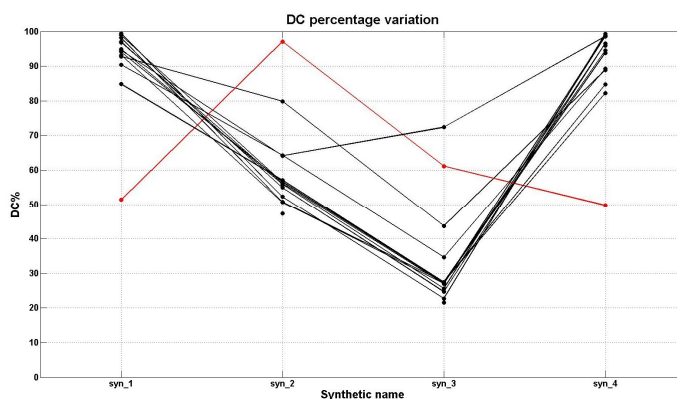
در روش برگردان نسبی تانسور گشتاور (RMTI) به گونه‌ای عمل می‌شود تا اثر تابع گرین تا حد ممکن از رابطه فوق کمینه شود. داهم (۱۹۹۶) رابطه (۱) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$u_n(x, t) = ma(\theta, \varphi)I_n(X, t; \xi, \tau), \quad (2)$$

که تابع گرین به دو عبارت تفکیک شده است، m تانسور گشتاور لرزه‌ای است، عبارت اول یعنی $a(\theta, \varphi)$ تابعی است که چگونگی مسیر موج را تشریح می‌کند و وابسته به دو زاویه خروج (take-off angle) یعنی θ و φ است. عبارت دوم تابع گرین برابر $I_n(X, t; \xi, \tau)$ است که اثر مسیر انتشار موج بین چشمه و گیرنده را بیان می‌کند. برای زمین‌لرزه‌هایی که نزدیک هم رخ داده‌اند و در ایستگاه‌های مشترک ثبت

جدول ۳. مدل پیچیده‌تر از IASP91 (مدل استفاده شده در تولید داده‌های سری چهارم). این مدل در مقایسه با IASP91 دارای لایه‌های بیشتری در بالای مرز موهو است.

Top of layer (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	RHO (gr/cm ³)
0	5.550	3.210	2.200
5	5.800	3.360	2.720
10	6.100	3.530	2.900
15	6.300	3.640	3.000
25	6.500	3.750	3.200
35	8.040	4.470	3.320



شکل ۴. روند تغییرات مقدار درصد دوزوج نیرو در برگردان مطلق برای زمین لرزه‌های ۱ تا ۱۴ در سری‌های متفاوت. (خط سرخ، روند تغییرات زمین لرزه شماره ۹ را نشان می‌دهد). فاصله زمین لرزه شماره ۹ تا ایستگاه بندرعباس BNDS حدود هشت کیلومتر است. (نگاه شود به شکل ۲).

دوم تابع گرین یعنی $I_n(X, t; \xi, \tau)$ از رابطه حذف می‌شود، که این مسئله تفاوت اساسی روش برگردان مطلق و روش برگردان نسبی را نشان می‌دهد. خوشه‌ای بودن زمین لرزه‌ها در فواصل محلی شرط اساسی برای به کار بردن این روش است، این موضوع از آن جهت مورد اهمیت است که فرض روش برگردان نسبی برای از بین بردن عبارت دوم تابع گرین زمانی قابل قبول است که مسیر موج بین چشمه تا ایستگاه برای زمین لرزه مرجع و زمین لرزه مورد بررسی تقریباً یکسان باشد، این حالت زمانی امکان پذیر است که زمین لرزه‌ها تا حد ممکن نزدیک به هم رخ داده باشند.

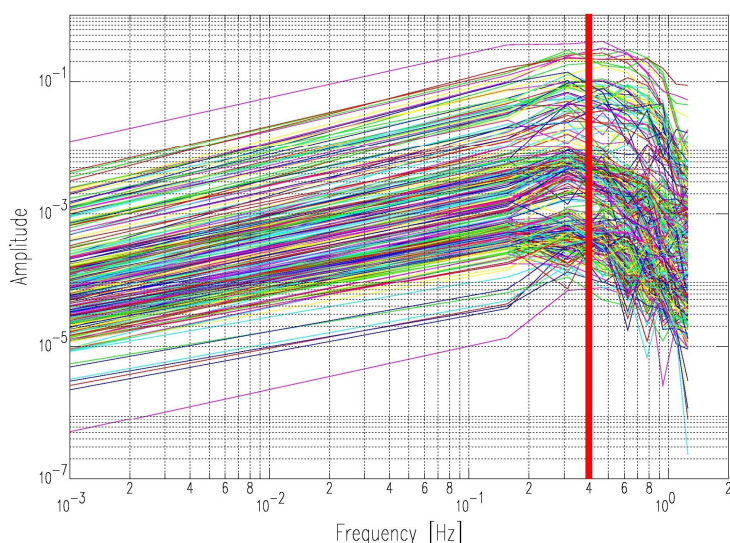
$$\frac{u_n^R(x, t)}{u_n(x, t)} = \frac{m^R a^R(\theta, \varphi)}{ma(\theta, \varphi)}, \quad (3)$$

که بالانویس R به معنی زمین لرزه مرجع است. در این رابطه پارامتر جابه‌جایی‌های ثابت شده هر دو زمین لرزه در یک ایستگاه مشترک معلوم است، همچنین تانسور گشتاور زمین لرزه مرجع و عبارت اول تابع گرین برای هر دو زمین لرزه نیز مشخص است و تنها مجهول این رابطه تانسور گشتاور زمین لرزه مورد نظر است (داهم، ۱۹۹۶).

حال با شش داده مستقل (نظیر فاز یکسان خوانده شده در ۶ ایستگاه متفاوت و یا ۶ فاز متفاوت در یک ایستگاه یکسان برای ۲ زمین لرزه نزدیک به هم) می‌توان تانسور گشتاور را محاسبه کرد. با این روش اثر تابع گرین با اندازه‌گیری نسبی جابه‌جایی‌ها کاهش می‌یابد و عبارت

جدول ۴. نتایج برگردان برای سری اول لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی.

Event	ID	Str1°	Dip1°	Rak1°	Str2°	Dip2°	Rak2°	%DC	Ref
060325_0728	1	300.75	42.77	125.39	76.69	56.38	61.82	68	
060325_0856	2	300.58	38.44	125.99	77.74	59.80	65.00	89	
060325_0953	3	288.69	38.52	107.61	86.60	53.59	76.46	58	
060325_0955	4	275.75	34.59	88.27	97.84	55.43	91.19	99	*
060325_1000	5	266.85	30.54	69.87	109.9	61.51	101.47	99	*
060325_1022	6	309.16	44.15	127.97	81.75	56.69	59.15	88	
060325_1102	7	310.28	46.68	125.77	83.87	53.82	58.20	93	
060325_1116	8	309.86	45.69	127.39	82.28	55.35	58.11	87	
060325_1150	9	136.19	46.64	110.73	287.32	47.16	69.45	94	
060325_1157	10	268.66	22.09	102.17	75.56	68.44	85.11	78	
060325_1213	11	279.36	28.54	121.84	64.11	66.06	73.99	90	
060325_1458	12	227.52	36.27	35.29	107.81	70.02	120.92	62	
060325_1748	13	214.96	41.43	15.22	113.43	80.00	130.42	93	
060325_2123	14	307.59	39.35	125.61	84.78	58.97	64.47	88	



شکل ۵. طیف دامنه مؤلفه‌های قائم لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در حوزه بسامد برای موج P (خط سرخ محل تقریبی بسامد گوشه را نشان می‌دهد. توجه شود که محورهای این نمودار هر دو از نوع لگاریتمی هستند).

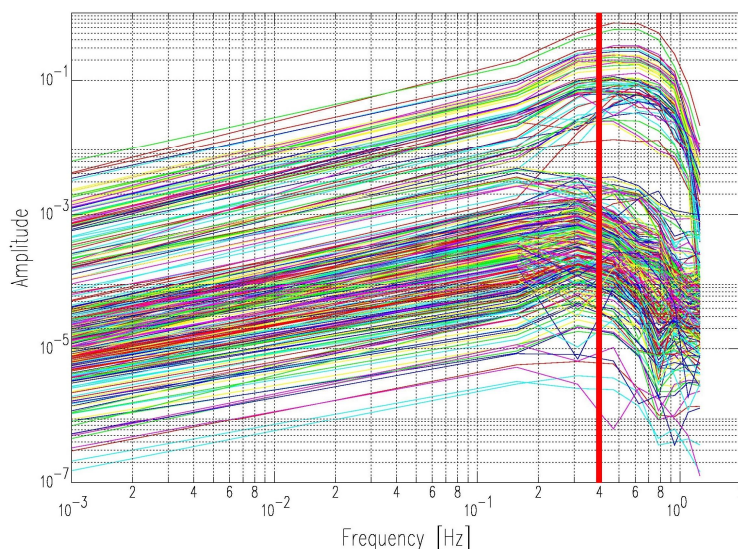
زمین‌لرزه‌ها در پنج ایستگاه (BNDS, KRBR, GHIR,) مطابق با شبکه نوار پهن پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (INSN) تولید شد، (برای مثال نگاه کنید به شکل ۲، مربوط به ایستگاه KRBR). با توجه به موقعیت ایستگاه‌های پیش گفته، چهار سری لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی که در مقدار درصد دوزوج نیرو و مدل سرعتی پوسته اختلاف دارند (جدول ۲) تولید شد. روش استفاده شده در تولید لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی روش انتگرال‌گیری روی عدد موج است (بوشون، ۱۹۸۱)، که با استفاده از نرم‌افزار CPS 3.30 (هرمن، ۱۹۹۶) صورت گرفت. مولفه‌های تولید شده قائم (Z)، شعاعی (R) و مماسی (T) هستند.

۱-۲ تولید داده‌های مصنوعی

برای بررسی روش برگردان نسبی تانسور گشتاور از داده‌های مصنوعی استفاده شده است. این داده‌ها شامل ۱۴ رخداد زمین‌لرزه‌اند که موقعیت مکانی آنها براساس زمین‌لرزه فین مورخ ۲۵ مارس ۲۰۰۶ و ۱۳ پس‌لرزه‌های آن بنا شده است، (شکل ۱). مشخصات زمانی، مکانی و بزرگی این ۱۴ زمین‌لرزه پس از مکان‌یابی مجدد در جدول ۱ نشان داده شده است. مکان‌یابی مجدد با استفاده از داده‌های زمان رسید موج P برگرفته از سایت ISC و مدل سرعتی منطقه زاگرس طبق تحقیقات هاتزفلد و همکاران (۲۰۰۳) و با استفاده از نرم‌افزار hyp2000 (کلین، ۲۰۰۲) صورت گرفته است. شکل موج مصنوعی

جدول ۵. نتایج برگردان زمین‌لرزه ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب و پنج پس‌لرزه آن. سازوکار مرجع از سوی global CMT گزارش شده است.

Event	ID	Str1°	Dip1°	Rak1°	Str2°	Dip2°	Rak2°	DC%	Ref
060228 0731	1	302.58	19.51	117.65	93.52	72.80	80.67	71.91	*
060228 0840	2	287.53	35.86	122.97	68.85	60.56	68.52	97.24	
060228 2001	3	285.01	15.27	120.00	74.12	76.82	82.23	72.86	
060308 1230	4	297.30	41.68	125.88	73.21	57.40	62.44	86.57	
060310 0941	5	289.84	24.89	118.12	79.34	68.21	77.66	62.33	
060311 2133	6	290.15	24.95	106.88	91.65	66.19	82.31	34.25	

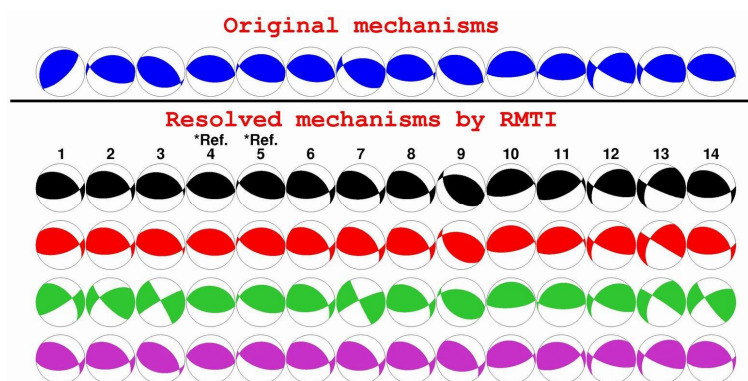


شکل ۶. طیف دامنه مؤلفه‌های مماسی لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در حوزه بسامد برای موج S (خط سرخ محل تقریبی بسامد گوشه را نشان می‌دهد. توجه شود که محورهای این نمودار هر دو از نوع لگاریتمی هستند).

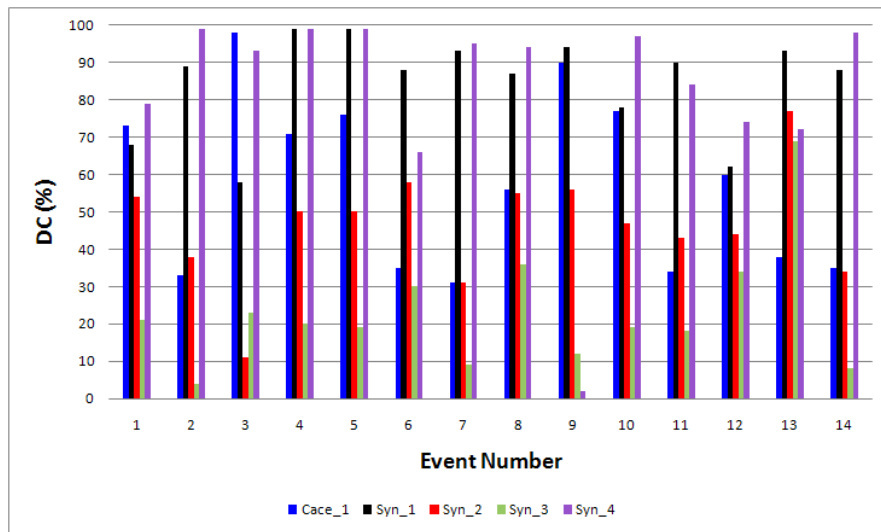
۲-۲ برگردان به روش مطلق

برای برگردان تانسور گشتاور به روش مطلق از نرم‌افزار ایزولا (ISOLA) که سوکو و زاهرادنیک (۲۰۰۸) معرفی کرده‌اند استفاده شد. در این روش با تعیین محل رومرکز زمین‌لرزه و با ساختن چشمه‌های نقطه‌ای متعدد در زیر رومرکز به جواب بهینه خواهیم رسید. منظور از جواب بهینه جوابی است که بیشترین همبستگی را با داده‌های

مشاهده‌ای داشته باشد. نتایج این برگردان را در شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان دید. با دقت در نتایج به‌دست آمده مطابق شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که جواب قسمت دوزوج نیروی زمین‌لرزه‌ها تقریباً به‌طور کامل حاصل شده است. همچنین از لحاظ مقدار درصد دوزوج نیرو همه زمین‌لرزه‌ها بجز زمین‌لرزه شماره ۹ با اختلاف ناچیزی در هر چهار سری، درست حاصل شده است.



شکل ۷. نتایج حاصل از برگردان نسبی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای زمین‌لرزه‌های شماره ۱ تا ۱۴ زمین‌لرزه‌های ۴ و ۵ مرجع هستند. به‌ترتیب از بالا به پایین (آبی): سازوکار به‌کار رفته در تولید داده‌های مصنوعی، مشکلی: سازوکار حاصل از برگردان سری اول (درصد دوزوج نیرو ۱۰۰ و مدل سرعتی به‌کار رفته IASP91)، سرخ: سازوکار حاصل از برگردان سری دوم (درصد دوزوج نیرو ۵۰ و مدل سرعتی به‌کار رفته IASP91)، سبز: سازوکار حاصل از برگردان سری سوم (درصد دوزوج نیرو ۲۰ و مدل سرعتی به‌کار رفته IASP91)، بنفش: سازوکار حاصل از برگردان سری چهارم (درصد دوزوج نیرو ۱۰۰ و مدل سرعتی به‌کار رفته پیچیده‌تر از IASP91 مطابق با جدول ۳).

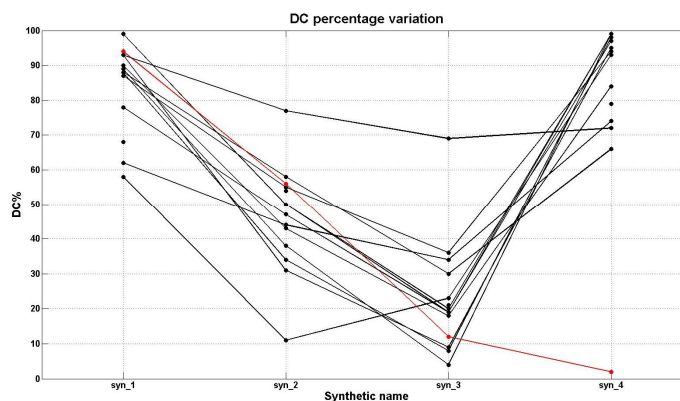


شکل ۸. مقدار درصد دوزج نیرو در برگردان‌های متفاوت برای زمین‌لرزه‌های ۱ تا ۱۴ (آبی: داده‌های حقیقی، مشکی: داده‌های مصنوعی سری اول، سرخ: داده‌های مصنوعی سری دوم، سبز: داده‌های مصنوعی سری سوم، بنفش: داده‌های مصنوعی سری چهارم).

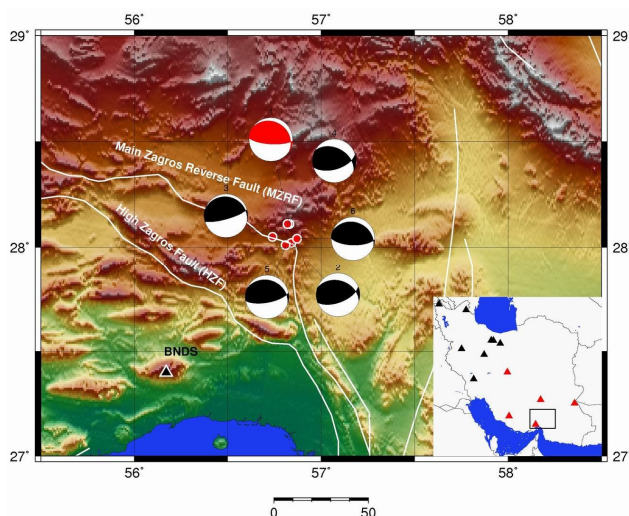
۳-۲ برگردان نسبی تانسور گشتاور

با توجه به فرض اولیه مسئله مبنی بر نقطه‌ای بودن چشمه در مکان و زمان، در برگردان نسبی فیلتر میان‌گذر را روی داده‌ها اعمال می‌کنیم. محدوده بسامدی انتخاب شده بایستی طوری باشد که هم تناوب امواج مورد بررسی از ابعاد شکستگی بلندتر باشد (از بسامدهای کم استفاده شود) و هم از بسامد گوشه (corner) کمتر باشد. با بررسی طیف دامنه امواج در حوزه بسامد مشخص شد که بسامد گوشه برای هر دو نوع فاز P و S بین ۰/۳ تا ۰/۵ هرتر

متغیر است، بنابراین محدوده بسامدی مورد بررسی در این تحقیق از ۰/۱ تا ۰/۲ هرتز انتخاب شده است. داده‌های استفاده شده در این روش، دامنه فازهای مستقیم P و S هستند. زمان رسید این فازها توسط مدل پوسته‌ای IASP91 (کنت و انگدال، ۱۹۹۱) محاسبه شده است. پس از محاسبه زمان رسید فازهای پیش‌گفته، برای برگردان نسبی تانسور گشتاور از دامنه شکل موج در پنجره زمانی ۲ ثانیه قبل از زمان رسید فاز موردنظر و ۳



شکل ۹. روند تغییرات مقدار درصد دوزج نیرو در برگردان نسبی برای زمین‌لرزه‌های ۱ تا ۱۴ در سری‌های متفاوت (خط سرخ روند تغییرات زمین‌لرزه شماره ۹ را نشان می‌دهد). فاصله زمین‌لرزه شماره ۹ تا ایستگاه بندرعباس BNDS حدود هشت کیلومتر است. (نگاه شود به شکل ۲). روند غیرمنطقی تغییرات درصد دوزج نیرو برای زمین‌لرزه شماره ۹ در برگردان مطلق نیز دیده می‌شود (نگاه شود به شکل ۴).



شکل ۱۰. موقعیت زمین‌لرزه اصلی ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب و پس‌لرزه‌های آن و نتایج سازوکار براساس برگردان نسبی صورت گرفته در این تحقیق (زمین‌لرزه مرجع با سازوکار سرخ‌رنگ نشان داده شده است). مقادیر سازوکار مرجع (سازوکار سرخ‌رنگ) برگرفته از گزارش‌های global CMT است. موقعیت ایستگاه‌های شبکه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در گوشه پایین سمت راست شکل نشان داده شده است. (مثلث‌های سرخ ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق و مثلث‌های مشکی سایر ایستگاه‌ها هستند).

داده‌های مصنوعی دارد اما در سری سوم اکثر صفحات چرخیده است نتیجه اینکه اگر مقدار درصد دوزوج نیرو خیلی پایین بیاید (در این تحقیق درصد دوزوج نیرو سری سوم داده‌ها ۲۰ درصد انتخاب شده است) تاثیر آن در نتایج برگردان مشاهده می‌شود (چرخش غیر عادی صفحات). با بررسی نتایج برگردان از لحاظ مقدار درصد دوزوج نیرو در سری‌های گوناگون، به این نتیجه خواهیم رسید که در هر زمین‌لرزه روند منظمی از افزایش و کاهش درصد دوزوج نیرو مشاهده می‌شود که مستقیماً به اندازه درصد دوزوج نیرو موجود در داده‌های اولیه ارتباط دارد. از نتایج می‌توان به موفق بودن روش در محاسبه مقدار درصد دوزوج نیرو در اکثر زمین‌لرزه‌ها رسید. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، فقط زمین‌لرزه شماره ۹ از این قاعده مستثنی است، همان‌طور که پیش از این مشاهده شد، این تفاوت در برگردان به روش مطلق نیز مشهود بود. توجیهی که برای این استثنا پیشنهاد می‌شود نزدیکی محل چشمه به یکی از ایستگاه‌ها است.

ثانیه بعد از آن (برای فازهای P و S) استفاده شده است. سپس بیشینه دامنه موجود در این پنجره زمانی را به دامنه فاز مورد نظر نسبت می‌دهیم.

شکل‌های ۵ و ۶ طیف دامنه را در حوزه بسامد به ترتیب برای فازهای P و S (۱۴ زلزله در ۵ ایستگاه) نشان می‌دهد. طیف دامنه این فازها به ترتیب از روی مولفه‌های شعاعی و مماسی گرفته شده‌اند.

برای نمونه نتایج حاصل از برگردان تانسور گشتاور مربوط سری اول لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در جدول ۴ آورده شده است. با در نظر گرفتن موارد فوق، نتیجه برگردان برای این چهار سری داده مصنوعی در شکل ۷ آمده است، شکل ۸ نیز نشان‌دهنده مقادیر درصد مولفه دوزوج نیرو برای هر زمین‌لرزه است (مقدار درصد مولفه دوزوج نیرو برای هر زمین‌لرزه در سری‌های یک تا چهار)، در این برگردان آنها زمین‌لرزه‌های ۴ و ۵ به عنوان زمین‌لرزه‌های مرجع انتخاب شده‌اند. با دقت در نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که نتایج حاصل از برگردان سری اول، دوم و چهارم شباهت زیادی به سازوکار اولیه

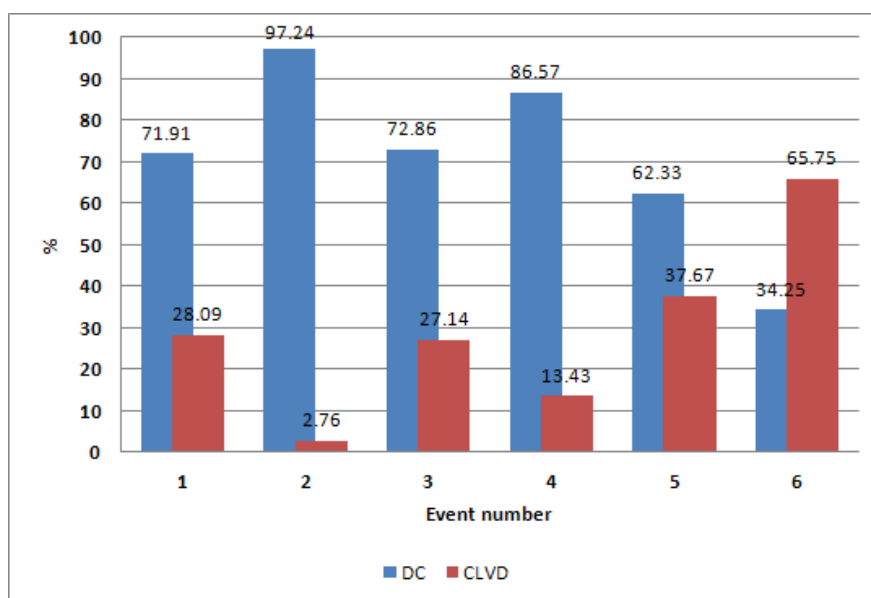
۴-۲ کاربرد روش روی داده‌های واقعی

برای بررسی روش با داده‌های واقعی از داده‌های خوشه زمین‌لرزه‌ای واقع در ۱۱۰ کیلومتری شمال-شرق بندرعباس استفاده شده است. این خوشه زمین‌لرزه شامل ۶ رخداد است (زمین‌لرزه اصلی و ۵ پس‌لرزه آن). زمین‌لرزه اصلی در ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ در ساعت ۰۷:۳۱ مطابق با زمان GMT و با بزرگای گشتاوری ۶/۰ ثبت شده است (رجوع شود به IRSC و ISC و IIEES). تانسور گشتاور این زمین‌لرزه که از سوی global CMT گزارش شده است (رجوع شود به جدول ۵) و در این تحقیق به منزله سازوکار زمین‌لرزه مرجع به کار رفته است. در محاسبات برای برگردان به روش نسبی، از داده‌های ۵ ایستگاه (BNDS, KRBR, GHIR, NASN, ZHSF) استفاده شده است. نتایج این برگردان را در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جدول ۵ می‌توان دید. سازوکارهای به‌دست آمده با تقریب خوبی به زمین‌لرزه اصلی شباهت دارند.

۳ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش برگردان نسبی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای به‌دست آوردن تانسور گشتاور زمین‌لرزه‌ها در مقیاس محلی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده در آزمون داده‌های مصنوعی نشان‌دهنده آن است که این روش برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌هایی که از لحاظ مکانی نزدیک به هم هستند و در ایستگاه‌های مشترکی ثبت شده‌اند بسیار مناسب است. همچنین از این روش می‌توان برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌هایی که کوچک هستند نیز استفاده کرد، زیرا روش‌های کلاسیک عموماً به گونه‌ای هستند که در بررسی زمین‌لرزه‌های بزرگ به کار می‌روند.

در میان نتایج آزمون داده‌های مصنوعی، نتایج زمین‌لرزه شماره ۹ از لحاظ مقدار درصد دوزوج نیروی به‌دست آمده در هر دو روش مطلق و نسبی با دیگر در میان نتایج آزمون داده‌های مصنوعی، نتایج زمین‌لرزه شماره ۹ از



شکل ۱۱. نمودار درصد دوزوج نیروی و غیر دوزوج نیروی حاصل از برگردان نسبی تانسور گشتاور زمین‌لرزه ۲۸ فوریه ۲۰۰۶ فاریاب و پنج پس‌لرزه آن.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به دلیل همکاری و در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر می‌شود.

منابع

- Bouchon, M., 1981, A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**(4), 959-971.
- Dahm, T., 1996, Relative moment tensor inversion based on ray-theory: theory and synthetic tests: *Geophys. J. Int.* **124**, 245-257.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., and Woodhouse, J. H., 1981, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity: *J. Geophys. Res.*, **86**, 2825-52.
- Gilbert, F., and Dziewonski, A. M., 1975, An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic spectra: *Phil. Trans. R. Soc. A* **274**, 369- 71.
- Global CMT Catalog Search, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K., and Ghafory-Ashtyany, M., 2003, Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros mountain belt (Iran): *Geophys. J. Int.*, **155**, 403-410.
- Herrmann, R. B., 1996, Computer Programs in Seismology, (last accessed August 2008), Saint Louis University, <http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/CPS330.html>
- Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS), <http://www.iris.edu>.
- International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), <http://www.iiees.ac.ir>.
- ISC Bulletin, <http://www.isc.ac.uk/search/bulletin/index.html>
- Kanamori, H., and Given, J. W., 1981, Use of long period surface waves for rapid determination of earthquake source parameters: *Phys. Earth Planet. In.* **27**, 8-31.
- Kennett, B. L. N., and Engdahl, E. R., 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification: *Geophysical Journal International*, **122**, 429-465.
- Klein, F., 2002, Hypoinverse earthquake location program: <ftp://ehzftp.wr.usgs.gov/klein/hyp2000>
- Langston, C. A., and Helmberger, D. V., 1975, A

لحاظ مقدار درصد دوزوج نیروی به‌دست آمده در هر دو روش مطلق و نسبی با دیگر زمین‌لرزه‌های مورد بررسی متفاوت است (شکل‌های ۴ و ۹). اگر به فاصله زمین‌لرزه‌ها از ایستگاه بندرعباس (BNDS) که نزدیک‌ترین ایستگاه به خوشه زمین‌لرزه‌ها است توجه کنیم، خواهیم دید که این فاصله برای زمین‌لرزه شماره ۹ بسیار کم است (حدود ۸ کیلومتر) و همین مسئله را می‌توان دلیلی برای مستثنی بودن این زمین‌لرزه از روند کلی دانست؛ زیرا این فاصله بسیار کم باعث افزایش دامنه در ایستگاه می‌شود که نسبت به دامنه زمین‌لرزه‌های دیگر (به‌خصوص زمین‌لرزه‌های مرجع) نوعی ناهنجاری به حساب می‌آید.

از طرفی دیگر اگر به شکل ۷ دقت کنیم، به روشنی مشخص است که در بین نتایج به‌دست آمده جواب‌ها در سری سوم از حالت مورد انتظار تقریباً دور است (صفحات بیشتر چرخیده‌اند)، درحالی‌که در دیگر سری‌ها نتایج به‌دست آمده از حد انتظار خارج نیست. از این روند می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر مقدار درصد دوزوج نیرو (سری سوم) در نتایج نهایی به‌مراتب بیش از تاثیر مدل پوسته‌ای (سری چهارم) است، یا به‌بیانی دیگر حساسیت برگردان تانسور گشتاور نسبی، به مقدار درصد دوزوج نیرو بیشتر از نوع مدل پوسته‌ای است. همچنین نتایج برگردان با داده‌های واقعی برای خوشه شمال شرق بندرعباس نشان‌دهنده یک سازوکار معکوس با کمی مولفه امتدادلغز برای اکثر این زمین‌لرزه‌ها است. راستای به‌دست آمده برای سازوکار این زمین‌لرزه‌ها نیز عموماً روند شرقی-غربی دارد که با تقریب خوبی منطبق با راستای گسل اصلی رورانده زاگرس (MZRF) در آن منطقه است.

- point source inversion of seismic data: *Computers and Geosciences*, **34**, 967-977.
- Strelitz, R. A., 1978, Moment tensor inversions and source models: *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **52**, 359-64.
- Stump, B. W., and Johnson, L. R., 1977, The determination of source properties by the linear inversion of seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 1489-502.
- Zahradnik, J., Jansky, J., and Papatsimpa, N., 2001, Focal mechanisms of weak earthquakes from amplitude spectra and polarities: *Pure Appl. Geophys.*, **158**, 647-665.
- procedure for modelling shallow dislocation sources: *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 42, 117- 30.
- Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, *Modern Global Seismology*: Academic Press, New York.
- Mendiguren, J. A., 1977, Inversion of surface wave data in source mechanism studies: *J. Geophys. Res.*, **82**, 889-94.
- Shomali, Z. H., and Roberts, R. G., 2009, An application of Relative Moment Tensor Inversion to the 26 December 2003 Mw 6.6 Iran-Bam Earthquake: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **99**(1), 159–171
- Sokos, E., Zahradník, J., 2008, ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-