

بررسی سازوکار زمین لرزه‌ها با استفاده از لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی

محمدرضا حاتمی^{۱*}، ظاهرحسین شمالی^۲ و غلام جوان دلویی^۳

^۱استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

^۳استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷،۴،۵، پذیرش نهایی: ۸۷،۷،۲)

چکیده

در این پژوهش مفاهیم اصلی سازوکار چشمه زمین لرزه و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی و برگردان خطی آنها در حوزه زمان بررسی می‌شود. در ابتدا از لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده ناشی از چشمه‌های دو زوج نیروی خالص که نمایانگر اکثر سازوکارهای زلزله‌های ایجاد شده با عوامل تک‌تونیکی هستند استفاده شد. همچنین از چشمه‌های زمین لرزه دو زوج نیرو ناخالص (Double-Couple+compensated linear vector dipole, CLVD) که تحت تأثیر عوامل تک‌تونیکی و غیر تک‌تونیکی (نظیر آتشفشان) هستند نیز بهره گرفته شد. لرزه‌نگاشت مصنوعی براساس روش انتگرال‌گیری روی عدد موج برای مدل سرعت پوسته فرضی محاسبه شده است. در تعیین سازوکار به روش برگردان، اثر محدوده بسامدی، غیر دقیق بودن مدل سرعت، تعداد مؤلفه‌ها و نحوه پراکندگی ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: لرزه‌نگاشت مصنوعی، سازوکار زمین لرزه، برگردان خطی

Focal mechanism analysis using synthetic seismograms

Hatami, M. R¹., Shomali, Z. H². and Javan-Doloei, Gh³.

¹Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

(Received: 25 Jun 2008, Accepted: 23 Sep 2008)

Abstract

According to the representation theorem, the elastic displacement due to a point source is given by the following equation:

$$U(x, t) = S(t) * G(x, t; \xi, \tau) * M_{ij}(\xi, \tau) \quad (1)$$

In this equation, $U(x, t)$ is the component of the displacement, $S(t)$ is the source time function which indicates how the energy is released during the earthquake process, $G(x, t; \xi, \tau)$, is the Green's function that describes the propagation path effects between the source located at (ξ, τ) and the station at (x, t) . M_{ij} are the moment tensor components. In this equation all components of the moment tensor are assumed to have the same time functionality. Computation of the Green's function is the most important

step for producing synthetic seismograms.

1. Simulation of an Earthquake and its Linear Inversion for a Completely Shear Source (Pure Double-Couple)

1-1 Earthquake Simulation: For the simulation purpose, a source with definite rake, dip and strike was assumed. The synthetic seismograms were then calculated using the wavenumber integration method based on a 12km source depth.

1-2 Linear Inversion of the Seismograms for Determination of the Earthquake source parameters under Pure Double-Couple Conditions: The moment tensor is an overall indication of the earthquake source i.e. the volume variations and a variety of shear source in different directions are included in the moment tensor. Consequently, an earthquake due to a pure double-couple can be considered as a special case of the moment tensor.

For big earthquakes, i.e. $M_w \geq 6.0$, the source time function also should be included in the inversion. In such cases, the unknown model parameters are the 6 components of the moment tensor and the source time function components.

In this section, the inversion was carried out under pure double-couple conditions. In other words it was assumed that the sum of moment tensor diagonal components was zero and the eigenvalues of the moment tensor were assumed to be 1, 0, and -1.

Different parameters may affect the solution in the linear inversion method e.g. the frequency band, the number of components involved and the way the stations are distributed. The effects of the most important parameters are discussed below.

A. The Effect of Frequency Band on the Inversion Solution: The linear inversion method was applied for different frequencies. In most cases, the earthquake specifications obtained were in complete agreement with the simulated earthquake which indicates that in the tested frequency bands, all the frequencies were below the corner frequency of the earthquake source. The solution obtained was very similar to the original mechanism. The fault plane resulted was perpendicular to the original plane that indicates the major fault plane and minor fault plane.

B. The Effect of the Number of Components Involved: The linear inversion method was applied for three different cases. First, the vertical components were used. Second, only the radial components were applied. Third, the inversion was varied solely by tangential components. In the first and second cases, the source coordinates were obtained precisely. But for the third one, the solution was completely wrong even though the depth was determined precisely.

C. The Effect of the Station Distribution Pattern: The effect of the station distribution was examined based on the configuration of seismographic stations in different quadrants. It was concluded that the solution can be obtained even though the data are from one quadrant but the more quadrant are involved the less error there will be.

2. Simulation of an Earthquake and its Linear Inversion for a Non-Pure Double-Couple (without volume variation)

2.1 Earthquake Simulation: In this mode, a five layered crustal model was used for simulation of synthetic seismograms in eight stations distributed in the four quadrants with respect to the source.

2.2 Linear Inversion of the Seismograms for Determination of the Earthquake source parameters under Non-Pure Double-Couple Conditions: In contrast to the linear inversion in 1.2, in this case, the inversion was used in conditions which were more similar to the reality. In the natural mode, the elastic waves traverse layers in the earth about which we don't have enough information. Therefore, in earthquake mechanism determinations, models are used which are much more simplistic than the real one.

Like the other case, each of the parameters affecting the solution in the linear inversion method will be examined briefly

A. The Effect of Frequency Band on the Inversion Solution: The linear inversion method was applied for different frequencies. In every case, a parabolic function with the corner frequency of 0.2Hz was used. In all the cases, the earthquake specifications were restored and, as in the other case, the depth was determined within 2 or 3 km of the original depth.

B. The Effect of the Number of Components Involved: Again the linear inversion method was applied for three different cases. And the results indicated that given the mechanism, the epicenter distances and the depth of the earthquake, the vertical components are of greater amplitudes, and therefore stabilize the solution to the inversion method.

C. The Effect of the Station Distribution Pattern: Again the effect of the station distribution was examined based on the configuration of seismographic stations in different quadrants and accordingly the solution could be obtained even though the data were from one quadrant but the more quadrants there were involved the less error there was.

Conclusion: Two different types of sources (pure and non-pure double-couple) were used to produce synthetic seismograms based on the wavenumber integration method for a given velocity model. In both cases, the source model was obtained precisely depending on the conditions. Generally, it can be concluded that if the velocity model is not precise its effect can be seen on CLVD as well as the depth. In addition, if the stations are distributed in at least two quadrants, more precise solutions will be gained.

Key words: Synthetic seismograms, Focal mechanism, Linear inversion

۱ مقدمه

دارای تابع زمانی منبع یکسانی هستند. بدیهی است برای تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی رابطه فوق، رابطه اصلی و مبنایی است. همچنین رابطه فوق برای تعیین مشخصات چشمه از طریق روش برگردان خطی تانسور گشتاور در حوزه زمان نیز به کار می‌رود.

برای تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی مهم‌ترین مرحله تعیین تابع گرین است. برای محاسبه تابع گرین روش‌های متفاوتی موجود است که برای مثال می‌توان از روش انتگرال‌گیری روی عدد موج (wavenumber integration method) (بوشن و آکی، ۱۹۷۷ و ونگ و هرمن، ۱۹۸۰) و روش پرتو لرزه‌ای (seismic ray method) (هرمن و ونگ، ۱۹۸۵ و هرمن، ۲۰۰۲) ذکر کرد.

براساس مبانی نظری امواج کشسان برای شبیه‌سازی جابه‌جایی یک زمین‌لرزه ناشی از یک چشمه نقطه‌ای از رابطه زیر استفاده می‌شود (آکی و ریچارد، ۱۹۸۰).

$$U(x, t) = S(t) * G(x, t ; \xi, \tau) * M_{ij}(\xi, \tau) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $U(x, t)$ جابه‌جایی ناشی از زمین‌لرزه در محل ایستگاه لرزه‌نگاری، $S(t)$ تابع زمانی چشمه است که بیانگر نحوه آزاد شدن انرژی در حین زمین‌لرزه است. $G(x, t ; \xi, \tau)$ تابع گرین، بیان‌کننده مشخصات محیط انتشار مابین چشمه در مختصات (ξ, τ) و لرزه‌نگار در مختصات (x, t) است. M_{ij} نیز تانسور گشتاور است تانسور گشتاور دارای ۶ مؤلفه مستقل است و در رابطه فوق فرض شده است که همه مؤلفه‌های تانسور گشتاور

۱ شبیه‌سازی یک زمین‌لرزه و برگردان خطی آن
برای یک منبع کاملاً برشی (دو زوج نیرو خالص)

۱-۱ شبیه‌سازی زمین‌لرزه

برای شبیه‌سازی، چشمه زمین‌لرزه‌ای با مشخصات، امتداد ۴۵ درجه، شیب ۹۰ درجه و ریک ۱۸۰ درجه فرض شد. بدیهی است با توجه به روابط موجود مابین امتداد، شیب، ریک و مؤلفه‌های تانسور گشتاور می‌توان مؤلفه‌های متفاوت تانسور گشتاور را به دست آورد (اکی و ریچارد، ۱۹۸۰ و اودیاس، ۱۹۹۹). سپس لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از روش انتگرال‌گیری روی عدد موج در سه مؤلفه قائم (vertical)، شعاعی (radial)، مماسی (tangential) براساس عمق منبع ۱۲ کیلومتر تولید شدند. مدل سرعت فرضی مورد استفاده شامل پنج لایه است که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی برای ۱۰ ایستگاه متفاوت در فواصل رو مرکزی ۷۰ تا ۱۳۰ کیلومتری که در سمت‌های متفاوتی نسبت به منبع واقع شده‌اند محاسبه شد (شکل ۱). برای تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی از فاصله نمونه‌ای (sampling interval) $dt = 0.250$ ثانیه و از تابع سهمی‌وار به مثابه تابع زمانی منبع با بسامد گوشه ۰/۲ هرتز استفاده شد.

برای نمونه مؤلفه قائم لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی ایجاد شده در ایستگاه‌های ۱ و ۲ در شکل ۲ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این شکل تفاوت قطبیت

موج مستقیم P و موج مستقیم SV است که به دلیل نحوه قرار گرفتن ایستگاه‌ها نسبت به سازوکار فرض شده برای منبع است.

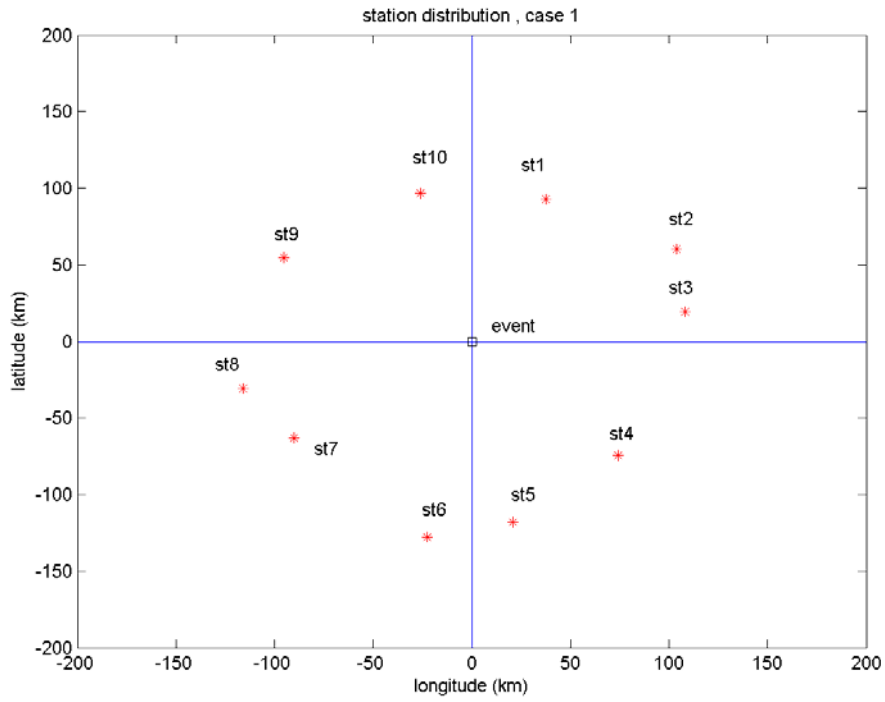
۲-۱ برگردان خطی لرزه‌نگاشت‌ها برای تعیین مشخصات زمین‌لرزه تحت شرایط دو زوج نیروی خالص

در رابطه (۱) توضیح داده شد که تانسور گشتاور دارای ۶ مؤلفه مستقل است. تانسور گشتاور نمایانگر کلی منبع زمین‌لرزه است. این به آن معنا است که تغییرات حجم (کاهش یا افزایش) و انواع جابه‌جایی برشی در جهت‌های متفاوت در تانسور گشتاور لحاظ شده است. در نتیجه منبع لرزه‌ای ناشی از دو زوج نیروی خالص نیز یکی از حالت‌های خاص تانسور گشتاور است. در رابطه (۱)، تابع زمانی چشمه نیز پارامتر مهمی است که در روش‌های معمولی برگردان خطی، در حوزه زمان، برای زمین‌لرزه‌های کوچک در فواصل محلی می‌توان اثر این تابع را حذف کرد. این عمل با فیلتر کردن و استفاده از بسامدهایی که پایین‌تر از بسامد گوشه تابع منبع مفروض‌اند امکان‌پذیر است (سایکیا، ۱۹۸۶). در این موارد به دلیل آنکه تعداد داده‌ها (نقاط نمونه‌برداری شده در مؤلفه‌های متفاوت و ایستگاه‌های متفاوت) به مراتب از تعداد مجهولات (مثلاً مؤلفه‌های تانسور گشتاور) بیشتر است، برای برگردان خطی می‌توان از روش کمترین مربعات استفاده کرد.

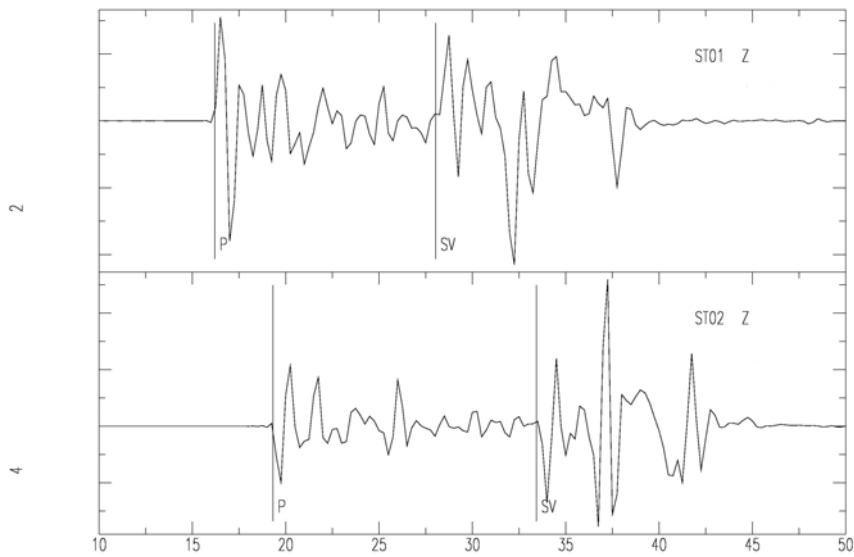
جدول ۱. مدل ساختار پوسته پنج‌لایه‌ای به کار گرفته شده. H ضخامت، VP، VS و RHO به ترتیب سرعت امواج طولی، سرعت امواج برشی و چگالی لایه‌های

پوسته هستند.

H(km)	VP(km/s)	VS(km/s)	RHO($\frac{g}{cm^3}$)
1	5.0	2.89	2.500
9	6.1	3.52	2.7300
10	6.4	3.70	2.8200
20	6.7	3.87	2.9020
0.0	8.15	4.7	3.3640



شکل ۱. منبع در مرکز (۰،۰) و ۱۰ ایستگاه در فواصل و سمت‌های متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۲. محدوده زمانی ۱۰ تا ۵۰ ثانیه‌ای لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی برای مؤلفه‌های قائم در ایستگاه‌های ۱ و ۲. محور قائم دامنه و محور افقی زمان (برحسب ثانیه) است.

جواب در عمق ۱۲ کیلومتری برآورد شد. قابل توجه است در اعماق متفاوت اگر چه میزان انطباق مابین داده‌های ورودی و داده‌های برگردان کمتر از جواب بهینه است ولیکن سازوکار زمین‌لرزه تغییر چشمگیری نمی‌کند. قابل توجه است که این مدل برای یک زمین‌لرزه با دو زوج نیرو خالص (بدون تغییر حجم) شبیه‌سازی شده بود.

در روش برگردان خطی پارامترهای زیادی می‌توانند در تعیین جواب تأثیر داشته باشند، برای مثال محدوده بسامدی، نحوه توزیع ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و تعداد مؤلفه‌ها را می‌توان نام برد. برای بررسی این عوامل روش برگردان خطی تحت شرایط زیر صورت گرفت.

الف- تأثیر باند بسامدی در نتیجه برگردان

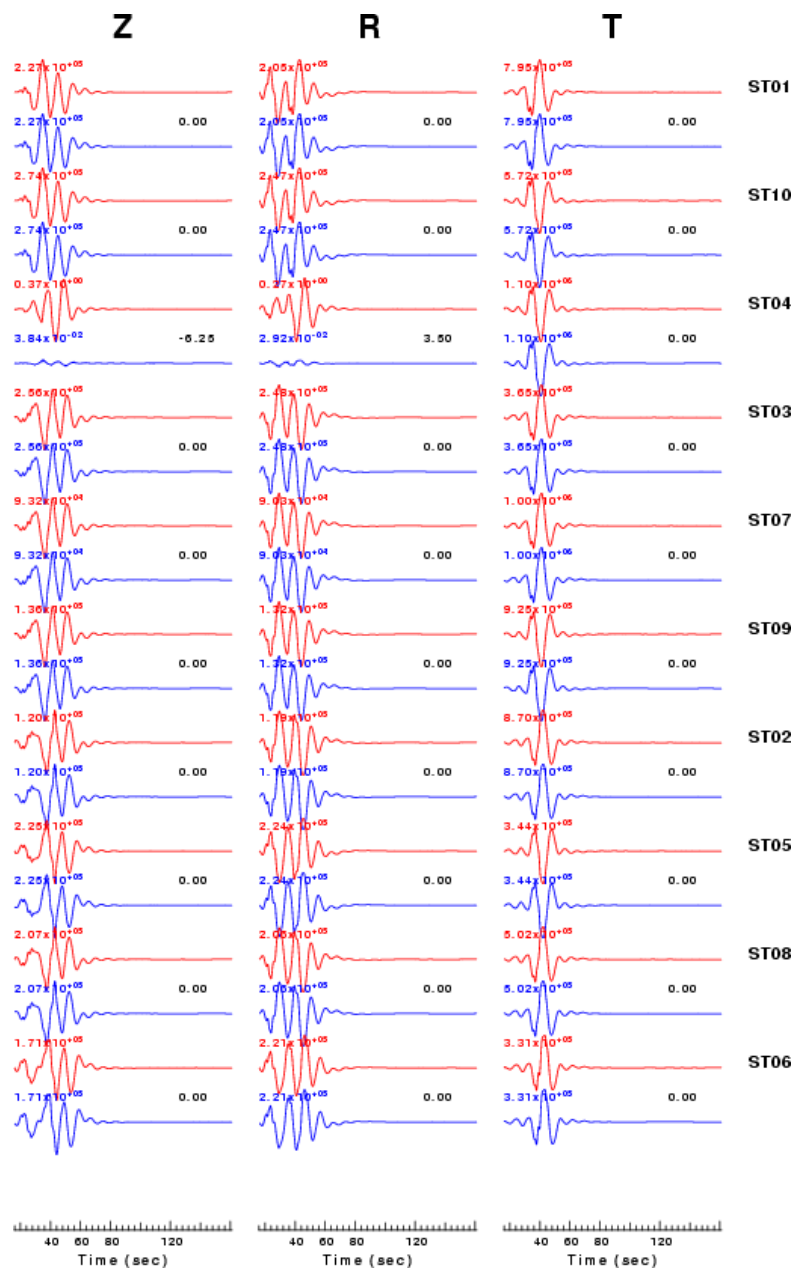
روش برگردان خطی برای محدوده‌های بسامدی ۰٫۵ تا ۰٫۲، ۰٫۲ تا ۰٫۰۵، ۰٫۱ تا ۰٫۰۲، ۰٫۱ تا ۰٫۰۸ و ۰٫۳ تا ۰٫۰۲ صورت گرفت. در اکثر موارد مشخصات زمین‌لرزه به‌دست آمده با زمین‌لرزه شبیه‌سازی شده همخوانی کامل داشت که این نشان می‌دهد که در محدوده‌های بسامدی پیش‌گفته تماماً از بسامدهایی استفاده شده است که کمتر از بسامد گوشه تابع منبع‌اند. برای مثال نتایج برگردان برای باند بسامدی ۰٫۲ تا ۰٫۰۵ هرگز در جدول ۲ آورده شده است. قابل توجه است که جواب به‌دست آمده در این قسمت کاملاً شبیه سازوکار اولیه است. صفحه گسلی به‌دست آمده در این حالت، صفحه عمود بر صفحه مفروض اولیه است. این مسئله نشانگر ابهام (ambiguity) در تعیین صفحه گسل اصلی و صفحه گسل فرعی در زمین‌لرزه‌شناسی است.

اگر زمین‌لرزه بزرگ باشد برای مثال ($M_w > 4$) بدیهی است که اثر بسامد گوشه قابل حذف نیست و باید در روش برگردان تعیین شود. در این موارد پارامترهای مجهول، ۶ مؤلفه تانسور گشتاور و مؤلفه‌های تابع زمانی چشمه هستند.

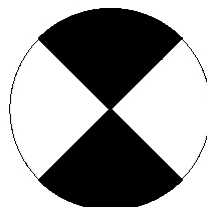
در این بخش روش برگردان تحت شرایط دو زوج نیرو خالص صورت گرفت و فرض شد که حاصل جمع مؤلفه‌های قطری تانسور گشتاور صفر و مقادیر ویژه (eigenvalues) تانسور گشتاور به ترتیب برابر ۱ و ۰ و -۱ است. تحت این شرایط روش برگردان خطی در حوزه زمان با استفاده از ۱۰ ایستگاه و در محدوده بسامدی ۰٫۱-۰٫۲ هرگز به انجام رسید. پاسخ روش برگردان در شکل ۳ نشان داده شده است و در جدول ۲ نیز آورده شده است. در شکل ۳-الف: شکل موج ورودی (سرخ) و شکل موجی که بر اثر برگردان حاصل شده به رنگ آبی در مؤلفه‌ها و ایستگاه‌های متفاوت نشان داده شده است. از آنجا که هیچ‌گونه نوفه‌ای به داده‌های ورودی اضافه نشده است. شکل موج حاصل از برگردان در اکثر موارد کاملاً شبیه با شکل موج ورودی است. با نگاهی دقیق‌تر می‌توان دریافت که تفاوت‌های جزئی مابین داده‌های ورودی با لرزه‌نگاشت‌های حاصل از برگردان وجود دارند. این تفاوت‌ها در مؤلفه‌های مماسی به صورت امواجی با بسامد زیاد پدیدار می‌شوند. در شکل ۳-ب: سازوکار زمین‌لرزه نشان داده شده است که کاملاً شبیه به سازوکار فرض شده در قسمت (۱-۱) است. در شکل ۳-ج برای تعیین عمق زمین‌لرزه روش برگردان برای اعماق ۱، ۵، ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ کیلومتری تکرار شده است. مطابق این شکل بهترین

جدول ۲. نتایج برگردان برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه در حالت‌های متفاوت.

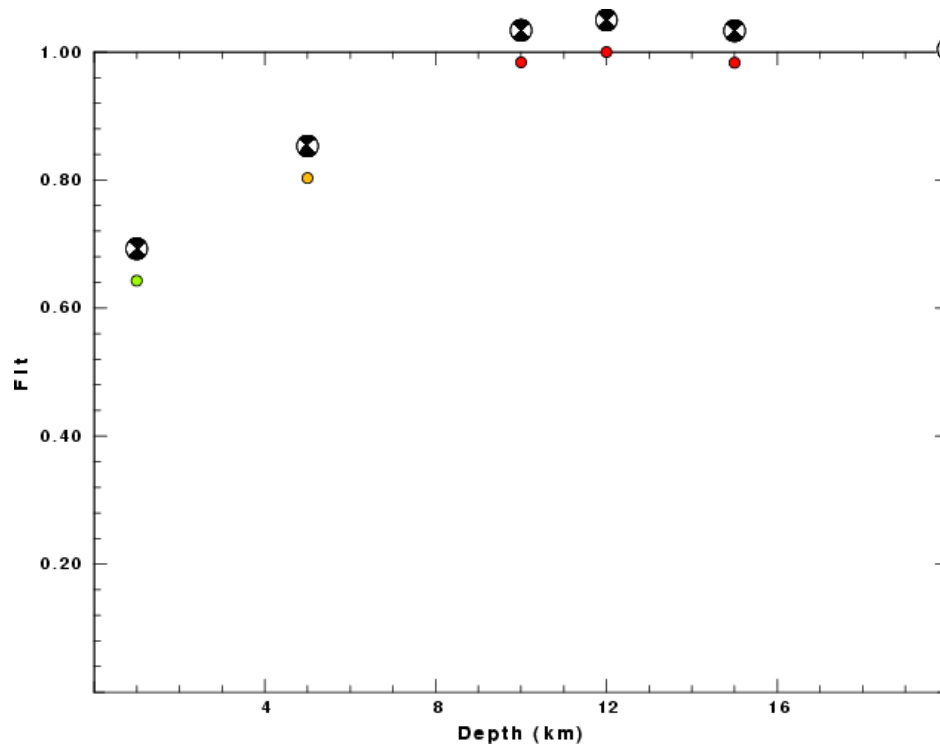
تعداد ایستگاه‌ها	محدوده بسامدی (هرتز)	امتداد (درجه)	شیب (درجه)	ریک (درجه)	عمق (کیلومتر)	تعداد مؤلفه‌ها
۱۰	۰٫۲ تا ۰٫۰۲	۳۱۵	۹۰	۰	۱۲	Z,R,T
۱۰	۰٫۲ تا ۰٫۰۰۵	۳۱۵	۹۰	۰	۱۲	Z,R,T
۱۰	۰٫۲ تا ۰٫۰۲	۹۰	۴۵	-۹۰	۱۲	T
۱	۰٫۲ تا ۰٫۰۲	۳۱۵	۹۰	۰	۱۲	Z,R,T



شکل ۳- الف. محورهای افقی زمان و محورهای قائم دامنه هستند، اعداد نوشته شده در زیر امواج، مقدار ماکزیمم مقدار دامنه‌اند.



شکل ۳- ب. سازوکار به‌دست آمده برای الگوی تابش (radiation pattern) موج P، قسمت سیاه نمایانگر حرکت فشارشی (compression) و قسمت سفید نمایانگر حرکت کششی (dilatation) است.



شکل ۳- ج. محور افقی عمق برحسب کیلومتر است و محور قائم مشخصه برازش که نشان دهنده میزان شباهت داده‌های ورودی با داده‌های برگردان شده است. این مشخصه نرمال سازی شده و بهترین جواب عمق در موقعی است که این مشخصه برابر یک شود.

ب- تأثیر تعداد مؤلفه‌ها در نتیجه برگردان

در این قسمت روش برگردان خطی برای سه حالت متفاوت بررسی شده است.

در حالت اول از مؤلفه‌های قائم ایستگاه‌ها استفاده شد، در حالت دوم فقط از مؤلفه شعاعی استفاده به عمل آمد و در حالت سوم برگردان صرفاً با مؤلفه‌های مماسی صورت گرفت. در حالت‌های اول و دوم، مختصات منبع به صورت دقیق به دست آمد. برای حالتی که از مؤلفه‌های مماسی (که می‌تواند در برگیرنده امواج SH و امواج سطحی لاو باشند) استفاده شد، جواب به دست آمده در روش برگردان برای سازوکار کاملاً اشتباه بود، اگرچه عمق به صورت دقیق تعیین شده است. در جدول ۲ مشخصات برآورد شده در حالت مماسی آورده شده است.

ج- تأثیر پراکندگی ایستگاه‌های زمین‌لرزه در نتیجه برگردان

در این قسمت تأثیر نحوه پراکندگی ایستگاه‌ها روی پاسخ برگردان بررسی شد. حالت‌های زیر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱).

۱- وقتی ایستگاه‌های زمین‌لرزه صرفاً در دو ربع غربی (ایستگاه‌های ۱۰، ۹، ۸، ۷ و ۱) نسبت به منبع قرار داشته باشند. لازم به یادآوری است که امتداد منبع ۴۵ درجه است.

۲- وقتی ایستگاه‌های زمین‌لرزه در دو ربع شرقی (ایستگاه‌های ۶، ۵، ۴، ۳ و ۲) نسبت به منبع قرار داشته باشند.

۳- از ایستگاه‌های نزدیک به محل منبع در امتداد آن استفاده شد (ایستگاه‌های ۷، ۶، ۲ و ۱).

$$M_{xx} = -1.0090 \quad M_{xy} = 0.2210 \quad M_{yy} = -0.5550$$

$$M_{xz} = 0.2690 \quad M_{yz} = -0.8400 \quad M_{zz} = 1.5640$$

مؤلفه‌های گشتاور تانسور فوق، منبعی را مشخص می‌کند با امتداد ۴۴ درجه، شیب ۶۰ درجه و ریک ۷۵ درجه و عمق ۱۸ کیلومتر که دارای ۳۳/۱ درصد دو زوج نیرو خالص (Double-Couple) و ۶۶٫۹ درصد دو زوج نیرو ناخالص (Compensated Linear Vector Dipole یا CLVD) است.

لیکن مؤلفه‌های فوق فاقد تغییرات حجمی‌اند، یا به عبارت دیگر $M_{xx} + M_{yy} = M_{zz}$ که اصطلاحاً به این مورد، حالت انحرافی (Deviatoric Constraint) می‌گویند.

سازوکار کلی مؤلفه‌های گشتاور تانسور داده شده (CLVD+DC) در شکل ۵-الف و سازوکار چشمه حاصل دو زوج نیرو خالص وابسته در شکل ۵-ب نمایش داده شده است.

۲-۲ برگردان خطی لرزه‌نگاشت برای تعیین مختصات زمین‌لرزه تحت شرایط دو زوج نیرو غیر خالص

برخلاف حالت برگردان خطی در ۱-۲، در اینجا سعی شد تا برای برگردان برای شرایطی شبیه‌تر به واقعیت مورد استفاده قرار گیرد. در حالت طبیعی امواج کشسان در محیط زمین در لایه‌هایی عبور می‌کند که ما اطلاعات دقیقی در مورد آنها نداریم و بنابراین در تعیین سازوکار زمین‌لرزه از مدل‌هایی استفاده می‌شود که به مراتب ساده‌تر از مدل واقعی زمین‌اند. در این تحقیق از مدل سرعتی یک لایه (عمق موهو در ۳۶ کیلومتری و سایر مشخصات در جدول ۳ آورده شده است) برای تعیین سازوکار در برگردان خطی استفاده شد. این مدل به مراتب از مدل سرعتی استفاده شده برای تولید داده‌های مصنوعی ورودی (جدول ۱) ساده‌تر است.

۴- از یک ایستگاه استفاده شد (ایستگاه ۱).

برای مثال، نتایج حالت چهارم در جدول ۲ آمده است. در همه موارد فوق، سازوکار مفروض به دست آمد. با توجه به این که مدل پوسته ساده بود و هیچ‌گونه نوفه‌ای بر داده‌های ورودی اضافه نشده بود، جواب‌های فوق منطقی به نظر می‌رسد. چنانچه می‌دانیم براساس بررسی‌های تجربی، سازوکار زمین‌لرزه را زمانی می‌توان به صورت تقریباً دقیق تعیین کرد که ایستگاه‌ها در دو ربع در فواصل متفاوت نسبت به منبع موجود باشند. لازم به ذکر است که سازوکار زمین‌لرزه را می‌توان با دستگاه سه مؤلفه‌ای نیز به دست آورد ولی در این حالت می‌بایست طول زمانی موج ورودی طویل و شکل موج دارای امواج درونی و تا جای ممکن سطحی باشد، یعنی باید از امواجی با زوایای خروجی (takeoff angle) متفاوت و بازه بسامدهای وسیع استفاده کرد.

۲ شبیه‌سازی یک زمین‌لرزه و برگردان خطی آن برای یک چشمه دو زوج نیرو غیر خالص (بدون تغییرات حجم)

۱-۲ شبیه‌سازی زمین‌لرزه

در این حالت برای شبیه‌سازی لرزه‌نگاشت مصنوعی از مدل پوسته پنج لایه، جدول ۱، در هشت ایستگاه که در ربع‌های چهارگانه نسبت به منبع پراکنده شده‌اند استفاده شد. فاصله رومرکز زمین‌لرزه تا ایستگاه‌ها از ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. موقعیت نسبی ایستگاه‌های شبیه‌سازی، نسبت به منبع در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این قسمت به علت آنکه هدف از ایجاد لرزه‌نگاشت مصنوعی، استفاده از چشمه برشی با مؤلفه‌های دو زوج نیرو ناخالص بوده، برای سازوکار چشمه از مؤلفه‌های تانسور گشتاور (۶ مؤلفه مستقل) استفاده شد. مؤلفه‌های تانسور گشتاور مورد استفاده به قرار زیر است.

می‌توان براساس نبود دقت در مدل سرعت توجیه کرد. سازوکار زمین‌لرزه نیز در اعماق متفاوت اگر چه میزان انطباق مابین آنها متفاوت است ولی به جز در اعماق کم (که سازوکار به‌دست آمده در آن کاملاً اشتباه است) شبیه به هم هستند؛ نتیجه در جدول ۴ آمده است.

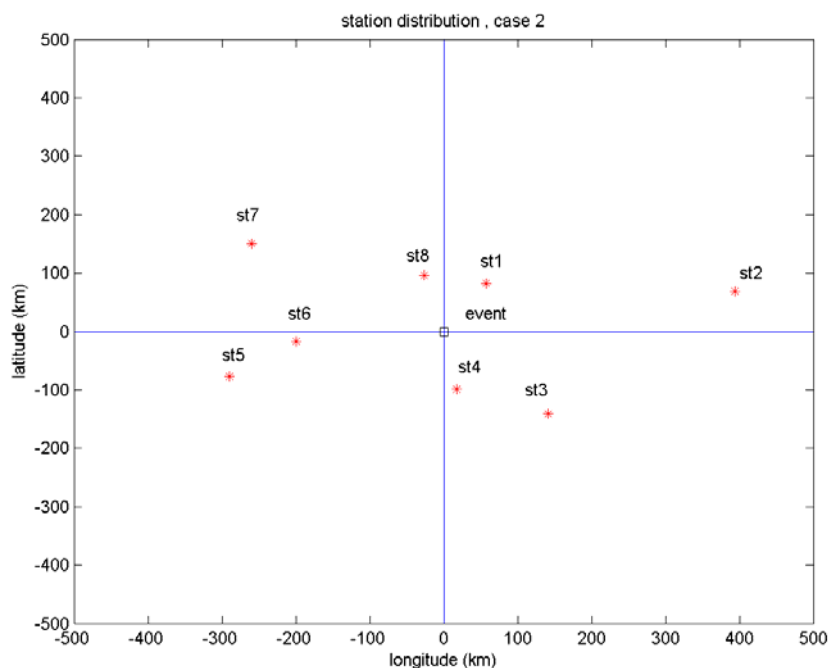
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که مشخصات منبع زلزله به‌صورت دقیقی به‌دست آمده است (مؤلفه‌های گشتاور و CLVD) و فقط عمق زلزله با ۲ کیلومتر خطا تعیین شد. قابل توجه است که در داده‌های ورودی از هیچ‌گونه نوفه‌ای استفاده نشده است. در نتیجه خطای عمق را صرفاً

جدول ۳. مدل سرعتی پوسته به کار گرفته شده برای برگردان خطی لرزه‌نگاشت. $H(km)$ ضخامت لایه‌ها را نشان می‌دهد و VP ، VS و RHO به ترتیب سرعت موج طولی، سرعت موج برشی و چگالی است.

$H(km)$	$VP(km/s)$	$VS(km/s)$	$RHO(g/cm^3)$
۳۶	۶٫۲	۳٫۵۷	۲٫۸۰۰
-	۸٫۰	۴٫۷۰	۲٫۳۰

جدول ۴. نتایج برگردان برای تعیین سازوکار زمین‌لرزه‌ها در حالت‌های متفاوت.

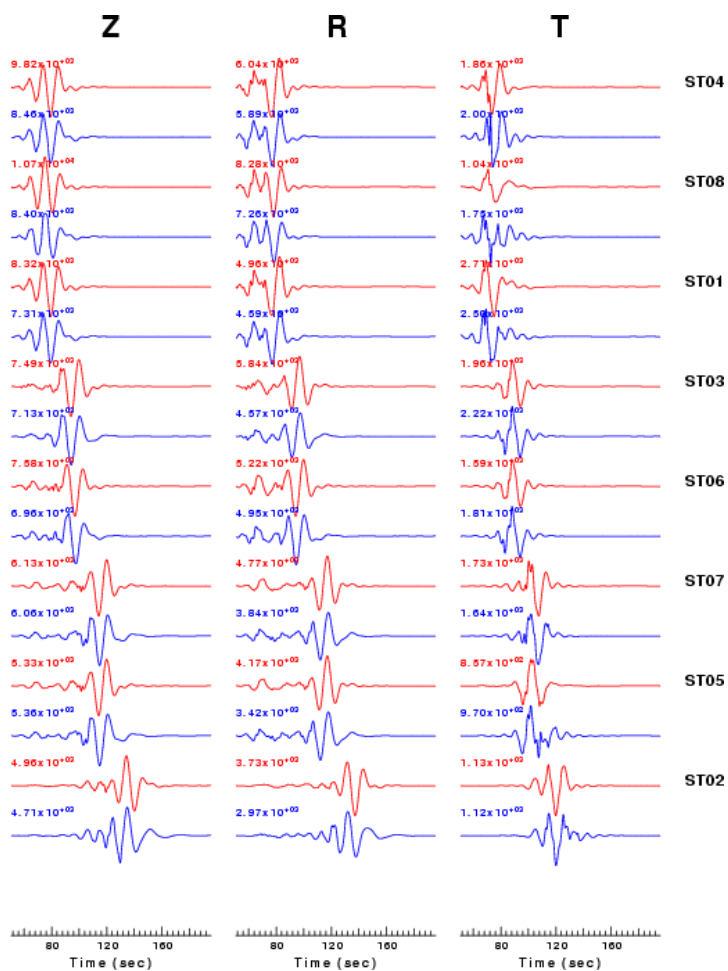
تعداد ایستگاه‌ها	مؤلفه‌ها	محدوده بسامد (هرتز)	امتداد (درجه)	شیب (درجه)	ریک (درجه)	عمق (کیلومتر)	CLVD%
۸	Z, T, R	۰٫۰۲-۰٫۲	۴۲	۶۱	۷۴	۱۶	۶۶٫۷
۸	Z, T, R	۰٫۰۰۵-۰٫۰۲	۴۲	۶۲	۷۵	۱۶	۶۷٫۵
۸	R	۰٫۰۲-۰٫۱	۲۰	۶۴	۸۵	۱۶	۵۰٫۳
۱	Z, T, R	۰٫۰۲-۰٫۱	۲۱۹	۷۶	-۱۲۹	۲۰	۵۶٫۲



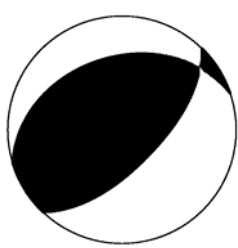
شکل ۴. منبع در مرکز (۰،۰) و ایستگاه‌ها در فواصل و سمت‌های متفاوت نشان داده شده است.



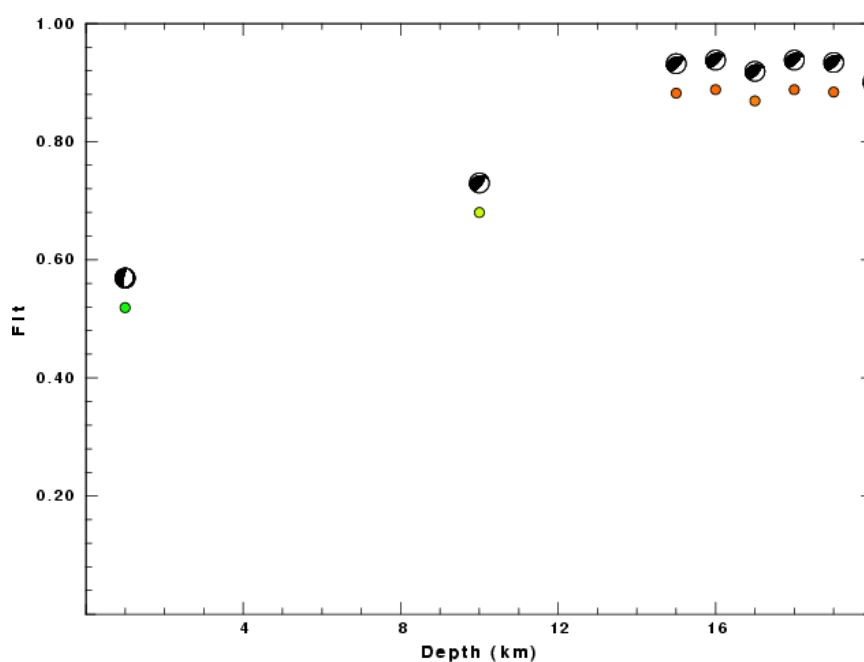
شکل ۵- الف. سازوکار منبع با دو زوج نیرو شامل (CLVD+DC). شکل ۵- ب. سازوکار منبع با دو زوج نیرو خالص وابسته.



شکل ۶- الف. محورهای افقی زمان و محورهای قائم دامنه هستند، اعداد نوشته شده در زیر آنها، مقدار ماکزیم دامنه را نشان می‌دهد.



شکل ۶- ب. سازوکار به دست آمده برای الگوی تابش (radiation pattern) موج P. قسمت سیاه نمایانگر حرکت فشارشی (compression) و قسمت سفید نمایانگر حرکت کششی (dilatation) است.



شکل ۶- ج. محور افقی عمق برحسب کیلومتر و محور قائم مشخصه برازش است. این مشخصه نشان دهنده نرمال شده میزان شباهت داده‌های ورودی با داده‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و بهترین جواب عمق در موقعی است که این مشخصه برابر یک شود.

محدوده‌های بسامدی ۰٫۰۰۵ تا ۰٫۰۲، ۰٫۰۴ تا ۰٫۰۸، ۰٫۰۵ تا ۰٫۱، ۰٫۰۸ تا ۰٫۱۵، در همه این موارد مشخصات منبع زمین‌لرزه (مؤلفه ۶ گانه گشتاور و درصد CLVD) بازیابی شد و صرفاً عمق نظیر حالت قبل، با دقت ۲ تا ۳ کیلومتر نسبت به عمق اولیه تعیین شد. برای مثال نتایج مربوط به محدوده بسامدی ۰٫۰۵ تا ۰٫۲

حال به بررسی حساسیت سازوکار زمین‌لرزه نسبت به موارد زیر می‌پردازیم.

الف- تأثیر محدوده بسامدی در نتیجه برگردان

یادآور می‌شود که برای تعیین لرزه‌نگاشت مصنوعی برای تابع زمانی منبع از تابع سهموی با بسامد گوشه ۰٫۲ هرتز استفاده شد. در این حالت، روش برگردان برای

هرتز در جدول ۴ نشان داده شده است.

تعیین CLVD ایستگاه‌ها باید در همه جهت‌ها نسبت به منبع پراکنده باشند.

ب- تأثیر تعداد مؤلفه‌ها در نتیجه برگردان

با استفاده از مؤلفه‌های قائم، سازوکار زمین‌لرزه با مشخصات نسبتاً دقیق و CLVD با ۱۰ درصد کاهش به‌دست آمد. لیکن با استفاده از مؤلفه‌های شعاعی، سازوکار دقیقی برای زمین‌لرزه به‌دست نیامد. نتایج حاصل از روش برگردان در جدول ۴ آورده شده است. در این قسمت می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با توجه به نوع سازوکار مفروض، فاصله‌های رومرکز استفاده شده و عمق زلزله، مؤلفه‌های قائم دارای دامنه بیشتری هستند و لذا باعث پایداری جواب در روش برگردان شده‌اند. بدیهی است که در صورت استفاده از فواصل رومرکز بالاتر در شبیه‌سازی زمین‌لرزه یا عمق کمتر و یا سازوکار متفاوت با آنچه در این حالت فرض شده، جواب نتیجه‌گیری ممکن است متفاوت باشد. لیکن به مثابه نتیجه‌ای کلی می‌توان بیان داشت که ترکیب مؤلفه‌ها برای محدود کردن جواب بهینه مفید خواهد بود.

۳- فقط ایستگاه ۲ در برگردان مورد استفاده قرار گرفت. در این حالت جواب به‌دست آمده دارای گردش ۱۸۰ درجه‌ای نسبت به جواب اصلی است. عمق نیز دارای خطای ۲ کیلومتر است. یادآور می‌شود که در حالت برگردان خطی برای دو زوج نیرو خالص که مدل سرعتی یکسانی نیز در شبیه‌سازی و برگردان مورد استفاده قرار گرفت، صرفاً وجود یک ایستگاه باعث تعیین سازوکار زمین‌لرزه شد اما در این حالت استفاده از یک ایستگاه نمی‌تواند جواب مناسبی ایجاد کند و دلیل آن وجود CLVD در منبع و استفاده از مدل سرعت نه چندان دقیق است. جواب حاصل از برگردان در جدول ۴ آورده شده است.

ج- تأثیر نحوه پراکندگی ایستگاه‌ها در نتیجه برگردان

در این قسمت حالت‌های زیر بررسی شد:

در این حالت نیز برای بررسی تأثیر باند بسامدی، تأثیر تعداد مؤلفه‌ها و نحوه پراکندگی ایستگاه‌های لرزه‌نگاری نسبت به منبع، روش برگردان را در حالت‌های متفاوت به انجام رساندیم. در ابتدا به بررسی حالتی از روش برگردان می‌پردازیم که از همه ایستگاه‌ها (شکل ۴) و همه مؤلفه‌ها (در باند بسامدی ۰٫۲ تا ۰٫۱ هرتز) استفاده شد. مدل منبع مفروض بازیابی شد و نتایج حاصل از برگردان در شکل ۶ نشان داده شده است.

۱- ایستگاه‌های ۲، ۶، ۸ (نگاه شود به شکل ۴) مورد استفاده قرار گرفت. در این حالت مختصات منبع زمین‌لرزه (شش مؤلفه گشتاور + CLVD) و عمق زمین‌لرزه به صورت دقیق به‌دست آمد.

۳ نتیجه‌گیری

در این بررسی لرزه‌نگاشت مصنوعی براساس روش انتگرال‌گیری روی عدد موج در فواصل محلی کمتر از ۴۰۰ کیلومتر برای مدل سرعت پوسته فرضی زمین محاسبه شد. لرزه‌نگاشت مصنوعی فوق درحکم داده ورودی برای برگردان خطی در حوزه زمان مورد استفاده قرار گرفت. دو نوع منبع متفاوت در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نوع اول منبعی دارای دو زوج نیرو خالص (کاملاً برشی) و نوع دوم، منبعی دارای دو زوج نیرو ناخالص

۲- ایستگاه ۸ و ۲ مورد استفاده قرار گرفت. در این قسمت مشخصات زمین‌لرزه (مؤلفه‌های گشتاور) و عمق زمین‌لرزه به‌صورت نسبتاً دقیق تعیین شد اما مقدار CLVD با کاهش نسبتاً شدید ($CLVD=14\%$) به‌دست آمد.

این دو حالت نشان‌دهنده این اصل کلی است که در تعیین سازوکار (امتداد، شیب، ریک) پراکندگی ایستگاه‌ها در فواصل متفاوت در دو ربع کفایت می‌کند اما برای

- Saikia, C. K., 1986, Waveform modeling of two earthquakes ($M \approx 1.1$) of July 1983 from the Miramichi aftershock zone, B. seismol. Soc. Am., **76**, 725-732.
- Wang, C. Y., and Herrmann, R. B., 1980, A numerical study of P-, SV-, and SH- wave generation in a plane layered medium, B. Seimol. Soc. Am., **70**, 1015-1036.

(برشی + غیر برشی) و بدون تغییرات حجم بود. در هریک از موارد فوق، مدل منبع مفروض (مؤلفه‌های گشتاور و عمق و CLVD) برحسب شرایط به صورت دقیق به دست آمد. می‌دانیم در تعیین سازوکار زمین‌لرزه، محدوده بسامدی، غیر دقیق بودن مدل سرعت، تعداد مؤلفه‌ها در ایستگاه‌های متفاوت و نحوه پراکندگی ایستگاه‌ها نسبت به چشمه اهمیت بسزایی دارد. لذا تأثیر این موارد روی سازوکار زمین‌لرزه در روش برگردان خطی بررسی شد. در این مقاله هیچ‌گونه نوفه‌ای به داده‌های ورودی اضافه نشد. به مثابه نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که در صورت غیر دقیق بودن مدل سرعت در تعیین سازوکار زمین‌لرزه، تأثیر اصلی در CLVD و عمق خواهد بود. همچنین اگر ایستگاه‌ها حداقل در دو ربع نسبت به مرکز زمین‌لرزه پراکنده شده باشند، جواب‌های دقیق‌تری خواهند داد.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش از نرم‌افزار هرمن (۲۰۰۲) استفاده شد که از پدیدآورندگان آن تشکر می‌شود.

منابع

- Aki, K., and Richards, Paul G., 1980, Quantitative Seismology Theory and Methods, W. H. Freedman and Company.
- Bouchon, M., and Aki, K., 1977, Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, B. Seismol. Soc. Am., **67**, 259-277.
- Herrmann, Robert B., 2002, Computer programs in seismology, version 3. 30, Department of Earth and Atmospheric Seismic Saint Louis University., www.eas.slu.edu.
- Herrmann, R. B., and Wang, C. Y., 1985, A comparison of synthetic seismograms, B. Seismol. Soc. Am., **75**, 41-56.
- Udias, A., 1999, Principles of seismology: Cambridge University Press.