

شروعی بر حل تانسور گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌های ایران با استفاده از داده‌های شبکه ملی

باند پهن لرزه‌نگاری ایران (INSN)

علیرضا علی‌نقی، استادیار پژوهشکده زلزله‌شناسی پژوهشگاه

۱- چکیده

چشمه لرزه‌ای را مدل‌سازی کرد و به حل قابل اتکا به منظور گنج‌اندین در فهرست حل گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌های فلات ایران دست یافت.

کلیدواژه‌ها: تانسور گشتاور لرزه‌ای، وارونگی، شبکه ایران

مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای همچون پارامترهای مکان و زمان وقوع یک رویداد لرزه‌ای، از مشخصات اصلی یک زمین لرزه محسوب می‌شوند که آگاهی از آنها برای مدل‌سازی حرکات جنبش زمین ضروری است. هدف از این مطالعه، حل گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌های کوچک تا متوسط ($3.5 < M < 6$) فلات ایران است که از یک سو مراکز بین‌المللی زلزله‌شناسی با استفاده از داده‌های دور لرزه‌ای حل تعداد محدودی از آنها را ارائه داده‌اند و از سوی دیگر، در تکمیل فهرست حل گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌ها و تبیین رژیم لرزه‌زمین ساخت مناطقی که فاقد زمین لرزه‌های بزرگ هستند حائز اهمیت بسیار می‌باشند. در این نوشتار، موج نقشه‌های چهار زمین لرزه متوسط که در پایگاه‌های شبکه ملی لرزه‌نگاری باندپهن ایران (INSN) به ثبت رسیده است و حل مرجع آنها نیز موجود می‌باشد در حوزه فرکانسی ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ هرتز وارون و مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای آنها محاسبه شده است.

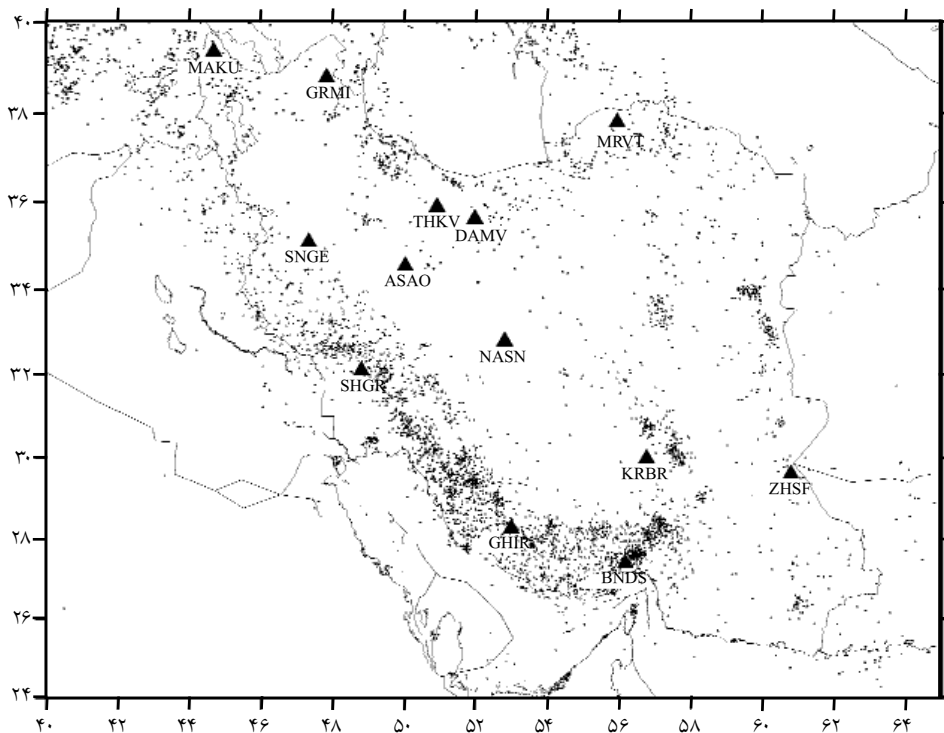
۲- مقدمه

شبکه ملی لرزه‌نگاری باندپهن ایران این امکان را فراهم آورده است که بررسی لرزه‌خیزی و سازوکار کانونی زمین لرزه‌های ایران با دقتی که قبلاً ممکن نبوده است میسر گردد؛ بویژه، در مورد زمین لرزه‌های کوچک تا متوسط که تعیین مکان و سازوکار کانونی آنها اهمیت بسزایی در تبیین حدود و رژیم لرزه‌ای ایالت‌های لرزه‌خیز دارد. در مناطقی چون گستره‌ای از زون زاگرس و یا حوالی تهران و البرز مرکزی که فاقد زمین لرزه‌های بزرگ با حل مرجع می‌باشند، وجود ایستگاه‌های باندپهن در فواصل ناحیه‌ای بیش از پیش حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق که شروعی بر مطالعه تفصیلی سازوکار کانونی زمین لرزه‌های کوچک تا متوسط ایران می‌باشد، با مدل‌سازی موج نقشه‌های زمین لرزه‌های ایران ثبت شده در ایستگاه‌های

نتایج این بررسی مبین آن است که حداقل برای زمین لرزه‌های متوسط با پیش فرض نقطه‌ای بودن کانون زمین لرزه، می‌توان با استفاده از داده‌های شبکه باندپهن ایران در فواصل ناحیه‌ای،

از آنجایی که امواج پیکری زلزله‌های ($M < 6.0$) در فواصل دور لرزه‌ای ($\Delta > 30^\circ$) با نسبت سیگنال به نوفه بالا ثبت نمی‌شوند (بویژه برای زمین لرزه‌های با سازوکار راست‌الغز) و امواج سطحی چنین زمین لرزه‌هایی نیز حاوی نوفه بسیار می‌باشد، بهترین راه، استفاده از داده‌های ثبت شده در فواصل $\Delta = (1-12)^\circ$ یا به اصطلاح ناحیه‌ای (Regional Distances) می‌باشد. اگر چه داده‌های ناحیه‌ای، پیچیده‌تر از داده‌های دور لرزه‌ای با دوره تناوبی بالا (که معمولاً این نوع داده‌ها در بررسی‌های چشمه لرزه‌ای در فواصل دور لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند) هستند، اما مطالعات، نشان از پایداری شکل امواج P_n و وابستگی آنها به مدل چشمه لرزه‌ای دارند [۱] و با فیلتر کردن داده‌های ناحیه‌ای در حوزه فرکانسی پایین می‌توان سازوکار کانونی و عمق کانون را محاسبه نمود. علاوه بر آن، داده‌های باند پهن امکان فیلتر کردن داده‌ها در حوزه فرکانسی بالا و در نتیجه بررسی فرآیندهای مرتبه بالاتر (Higher Order)

شبکه ملی لرزه‌نگاری ایران، کارایی روش بکار رفته از یک سو و قابل اتکا بودن و کیفیت مناسب داده‌های شبکه باند پهن ایران برای انجام این مطالعه از سوی دیگر نشان داده شده است. در این راستا و برای حصول اطمینان از درستی حلهای ارائه شده، چهار زمین لرزه متوسط تا بزرگ در مناطق لرزه‌ای مختلف در ایران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این زمین لرزه‌ها دارای حل مرجع بوده و بدین شکل کیفیت انجام کار کنترل گردیده است. نظر به چگونگی پراکندگی ایستگاه‌های شبکه باند پهن ایران نسبت به ایالت‌های لرزه خیز ایران (شکل ۱)، زلزله‌های متوسط حداقل توسط چندین پایگاه در فواصل ناحیه‌ای به ثبت می‌رسند که چنین آرایه‌ای امکان انجام مطالعه حاضر تا حصول به فهرستی از سازوکار زمین لرزه‌های کوچک تا متوسط را فراهم می‌سازد. علاوه بر آن، خصوصیت باند پهن بودن داده‌های شبکه، این امکان را فراهم می‌نماید که داده‌ها در حوزه فرکانسی مطلوب برای انجام مطالعه فیلتر شوند.



شکل (۱): نقشه موقعیت ایستگاه‌های فعال شبکه INSN که با مثلث‌های مشکی به همراه علامت اختصاری آنها در زمینه زمین لرزه‌های به بزرگای گشتاوری بیش از $M_w=3.5$ در خلال سالهای ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۶ توسط NEIC تعیین مکان شده‌اند.

چشمه لرزه‌ای چون جهت‌پذیری (Directivity) را فراهم می‌کند. مزیت دیگر داده‌های باندپهن، حوزه دینامیکی (Dynamic Range) بالایی آنهاست که این امکان را می‌دهد که زمین لرزه‌های کوچک و بزرگ توسط ایستگاههای یکسان ثبت شوند. بدین ترتیب که هم زمین لرزه اصلی و هم پس لرزه‌ها در یک دنباله (Sequence) لرزه‌ای می‌توانند تماماً و با استفاده از ایستگاههای یکسان مورد مطالعه قرار گیرند و چشمه مخصوصاً در مورد زمین لرزه‌های بزرگ مورد بررسی قرار گیرد.

در مورد زمین لرزه‌های کوچک با فرض ساده‌تر بودن تابع زمانی چشمه می‌توان انتشار امواج را شناسایی و آن را در مطالعه چشمه‌های لرزه‌ای قوی و پیچیده لحاظ نمود. در عین حال، طبیعی است که شبکه‌های ناحیه‌ای همچون شبکه باندپهن ایران با وجود پوشش خوب زمین لرزه‌های متوسط در پوشش مناسب زمین لرزه‌های کوچک بر علت پایین بودن نسبت سیگنال به نوفه ناموفق باشند. برای زمین لرزه‌های کوچک با چنین داده‌هایی مدلسازی تمامی موج نقش لازم است که در این صورت، حتی با یک یا چند ایستگاه امکان مدلسازی چشمه لرزه‌ای فراهم می‌گردد.

۳- اصول نظری و روش مطالعه

سازوکار چشمه‌های لرزه‌ای در این مطالعه بر مبنای مفهوم تانسور گشتاور لرزه‌ای بررسی شده‌اند. تانسور گشتاور لرزه‌ای توصیف کاملی از نیروهای هم‌ارز (Equivalent Forces) نشان می‌دهد. در این مطالعه چون چشمه‌های لرزه‌ای کوچک تا متوسط که ابعادی چند ده کیلومتری دارند، در حوزه دوره تناوب بالای ۳۰ ثانیه بررسی می‌شوند، می‌توان آنها را چشمه‌های لرزه‌ای نقطه‌ای (Point Source) محسوب کرد. جابه‌جایی زمین (d) در ایستگاه (S) هم‌امیخت (Convolution)

ترکیب خطی مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای $(M_{kj}(\xi, t))$ با مشتق تابعهای گرین $G_{sk,j}(x_1 \epsilon_1 t)$ و در حوزه زمان عبارت است از:

$$d_s(x, t) = M_{kj}(\epsilon, t) * G_{sk,j}(x, \epsilon, t) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $d_s(x, t)$ جابه‌جایی زمین در مکان x و زمان t ، M_{kj} مؤلفه درجه ۲ از تانسور گشتاور متقارن، (M) ، $G_{sk,j}^{(t)}$ مشتق تابع گرین نسبت به مختصات چشمه $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ بردار موقعیت ایستگاه با مختصات x_1, x_2, x_3 مطابق با شمال-شرق و پایین و ϵ بردار موقعیت چشمه لرزه‌ای نقطه‌ای با مختصات $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ مطابق با شمال-شرق و پایین می‌باشد. در مطالعه حاضر تابع زمانی چشمه، تابع دلتا فرض می‌شود و از این رو $M_{kj}(\epsilon, t) = M_{kj}(\epsilon) \cdot \delta(t)$ و معادله (۱) به شکل رابطه (۲) ساده می‌شود:

$$d_s(x, t) = M_{kj}(\epsilon) \cdot G_{sk,j}(t) \quad (2)$$

تابع گرین در مکان x نماینده پاسخ تپشی (Impulse Response) محیط انتشار امواج بین چشمه لرزه‌ای و گیرنده است. مشتق این تابع $G_{sk,j}(t)$ ، لرزه‌نگاشتی است که در مکان x ثبت شده است و ناشی از زوج نیرویی (Force Couple) در چشمه با بازویی در جهت ϵ_1 می‌باشد. $M_{kj}(\epsilon, t)$ نه مؤلفه دارد که به تمامی، نیروهای عمل‌کننده در چشمه لرزه‌ای را شامل می‌گردد. فقط شش مؤلفه از این نه مؤلفه با پیش شرط صفر بودن گشتاور زاویه‌ای مستقل هستند.

تانسور گشتاور لرزه‌ای، متقارن (Symmetric) است؛ می‌توان آن را چرخاند و در سیستم محورهای اصلی آورده، آن را قطری (Diagonal) نمود. تانسور قطری شده M را نیز می‌توان بدین ترتیب تجزیه نمود:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \text{tr}(M) & 0 & 0 \\ 0 & \text{tr}(M) & 0 \\ 0 & 0 & \text{tr}(M) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M'_1 & 0 & 0 \\ 0 & M'_2 & 0 \\ 0 & 0 & M'_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Deviatoric eigenvalues M'_1, M'_2, M'_3 ماتریس M هستند و

تانسور حاصل به روشی که در قبل توضیح داده شد، تجزیه و اندازه عددی گشتاور تانسور، مؤلفه‌های زوج دوگانه و CLVD ارائه شده‌اند.

۴- روش بررسی

مدلسازی تمامی موج نقشها برای هر سه مؤلفه ثبت شده زمین لرزه‌ها به روش درگر [۳] انجام پذیرفته است. با کاربرد این روش، می‌توان با استفاده از داده‌های ثبت شده توسط تعدادی محدود از ایستگاههای لرزه‌نگاری در فواصل ناحیه‌ای، عمل وارونگی به منظور حل مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای را با موفقیت انجام داد. برای محاسبه توابع گرین از مدل یک بعدی سرعت در پوسته و گوشته بالایی استفاده می‌شود. قبل از انجام عمل وارونگی، لرزه‌نگارهای مشاهده و محاسبه شده در محدوده فرکانسی 0.01-0.03Hz فیلتر می‌شود تا تأثیر پیچیدگیهای ساختارهای پوسته‌ای در محاسبات به حداقل برسد.

۴-۱- آماده‌سازی داده‌ها

زمین لرزه‌های ثبت شده در فواصل ناحیه‌ای توسط پایگاههای شبکه ملی لرزه‌نگاری باندپهن ایران ابتدا از اثر دستگاهی و سپس در حوزه فرکانسی 0.01-0.03Hz فیلتر می‌گردند. پس از چرخش مؤلفه‌های قائم-شمال-شرق به مؤلفه‌های سیستم RTZ، موج نقشها آماده وارونگی خواهند بود.

۴-۲- تهیه مجموعه توابع گرین

در این مرحله، از مدل یک بعدی پوسته در نظر گرفته شده برای فلات ایران که برگرفته از مدل IASP91 با اصلاح عمق موهو می‌باشد (جدول ۱)، استفاده شده و توابع گرین در همان حوزه فرکانسی مانند موج نقشهای ثبت شده فیلتر می‌شوند. اصلاح عمق موهو بر مبنای مطالعات دولویی و رابرت [۴] و علینقی و همکاران [۵] از ۳۳ کیلومتر به ۴۰ کیلومتر انجام شده است.

رد (Trace) ماتریس \mathbf{M} ، $(\text{tr}(\mathbf{M}))$ ، عبارت از $\text{tr}(\mathbf{M}) = M_1 + M_2 + M_3$ است. از آنجایی که زمین لرزه‌های زمین ساختی، برشی محسوب می‌شود، جزء همسانگرد (Isotropic) صفر بوده و در نتیجه $\text{tr}(\mathbf{M}) = 0$ می‌باشد و تنها پنج مؤلفه مستقل تانسور گشتاور باقی می‌مانند.

ماتریس قطری Deviatoric (عنصر دوم از سمت راست معادله) به چندین روش قابل تجزیه است. روش مورد نظر در این مطالعه، عبارت از تجزیه به اجزای همسانگرد، زوج دوگانه (Double Couple) و CLVD است:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \text{tr}(\mathbf{M}) & 0 & 0 \\ 0 & \text{tr}(\mathbf{M}) & 0 \\ 0 & 0 & \text{tr}(\mathbf{M}) \end{bmatrix} + \quad (4)$$

$$(1-2\varepsilon) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_3 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} + \varepsilon \begin{bmatrix} -M_3 & 0 & 0 \\ 0 & -M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 2M_3 \end{bmatrix}$$

در رابطه (۴)، ε نماینده اندازه مؤلفه CLVD نسبت به مؤلفه زوج دوگانه است. برای یک زمین لرزه با ساز و کار زوج دوگانه، $\varepsilon = 0$ و برای زمین لرزه کاملاً CLVD، $\varepsilon = \pm 0.5$ می‌باشد.

مزیت عمده تانسور گشتاور لرزه‌ای آن است که جابه‌جایی زمین ترکیبی خطی از پاسخ زمین با جهت‌های مختلف کوپل‌های تانسور است و بدین شکل وارونگی خطی تانسور گشتاور لرزه‌ای مقدور می‌گردد. نوع وارونگی انجام گرفته در این مطالعه، از نوع وارونگی در حوزه زمان است. در فرم ماتریس، معادله (۱) به صورت ماتریس قابل بازنویسی است:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G} \bar{\mathbf{m}} \quad (5)$$

در حوزه زمان، بردار \mathbf{d} نشان دهنده n نمونه از مشاهدات جابه‌جایی زمین در ایستگاههای با فواصل و آزمون‌های مختلف است. \mathbf{G} ماتریسی به ابعاد $n \times 6$ می‌باشد که حاوی توابع گرین و $\bar{\mathbf{m}}$ برداری حاوی شش مؤلفه تانسور است که باید تعیین گردند [۲].

جدول (۱): مدل پوسته‌ای استفاده شده در این مطالعه، برگرفته از مدل جهانی IASP91 می‌باشد. تغییر عمده، اصلاح عمق متوسط موهو از ۳۳ کیلومتر به ۴۰ کیلومتر برای فلات ایران است که این تغییر بر مبنای مشاهده‌های Receiver Function بوده است.

ضخامت (کیلومتر)	V_p	V_s	ρ	$Q\alpha$	$Q\beta$
۱۵	۵/۸	۵/۸	۵/۸	۵/۸	۵/۸
۲۵	۶/۸	۳/۹	۲/۹	۲۲۵	۱۰۰
۶۰۰	۸/۱	۴/۵	۳/۳	۲۲۵	۱۰۰

۴-۳ - وارونگی در حوزه زمان

حاصل وارونگی در حوزه زمان، دستیابی به مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای و سازوکار کانونی گسل می‌باشد.

۵- نتایج

در این قسمت، نتایج بررسی بر روی چهار زمین لرزه متوسط (اشکال ۲ تا ۵) که دارای حلهای مرجع ارائه شده توسط دانشگاه هاروارد می‌باشند، ارائه شده است.

در حل تانسور گشتاور لرزه‌ای زمین لرزه‌های بررسی شده،

مختصات سطوح اصلی و فرعی گسلی و M_w محاسبه شده، درصد مؤلفه DC، CLVD درصد مؤلفه همسانگرد، واریانس، کاهش واریانس، واریانس سیستم بر درصد کوپل داده‌ها نیز در سمت راست موج نقشها به همراه نقش سطوح اصلی و فرعی گسلی و محورهای اصلی تنش (P,T) آورده شده‌اند.

در اشکال (۲ تا ۵) حل مرجع ارائه شده توسط دانشگاه هاروارد آورده شده است که در آن علاوه بر اندازه عددی تانسور گشتاور لرزه‌ای، مختصات سطوح اصلی و فرعی گسلی نیز آمده است. نتیجه مدلسازی بر روی موج نقشها نیز آورده شده که در آن خطوط پیوسته، نمایانگر موج نقشهای ثبت شده (Observed) و خطوط بریده نمایانگر موج نقشهای ورساختی (Synthetic) است. تطابق قابل ملاحظه موج نقشهای محاسبه و ثبت شده و واریانس ناچیز، نشان از حلی با کیفیت بالاست.

TURKMENISTAN-IRAN BORDER

Date: 2004/10/7 Centroid Time: 21:46:24.8 GMT

Lat = 37.37 Lon = 54.32

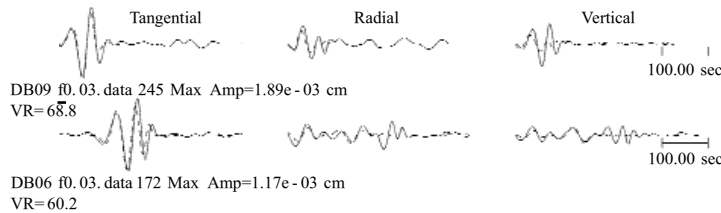
Depth = 32.0 Half duration = 1.6

Centroid time minus hypocenter time: 4.6

Moment Tensor: Expo=24 2.450-1.690-0.755-1.040 0.452-2.090 Mw=5.6 mb=5.6 Ms=5.4 Scalar=3.2e+24

Fault plane: strike = 27 dip = 46 slip = 53

Fault plane: strike = 254 dip = 55 slip = 122



Strike=23; 236

Rake = 67; 114

Dip = 49; 46

Mo = 2.25 e +24

Mw = 5.5

Percent DC = 87

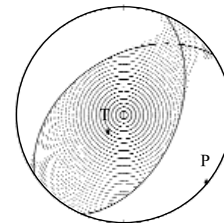
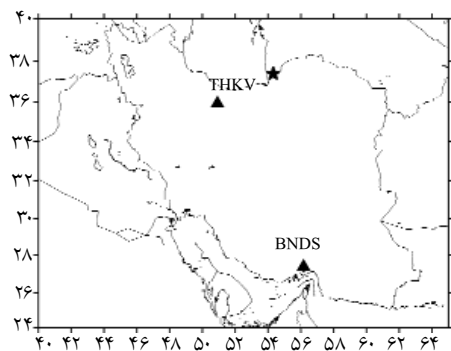
Percent CLVD = 13

Percent ISO = 0

Variance = 2.86 e -08

Var. Red = 6.39 e +01

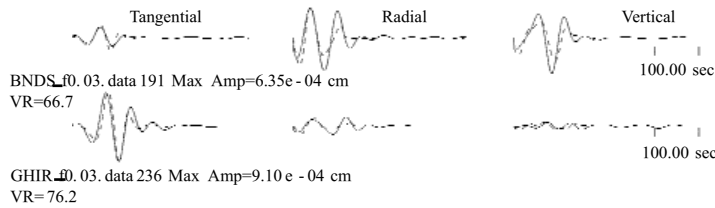
RES/Pdc. = 3.27 e -10



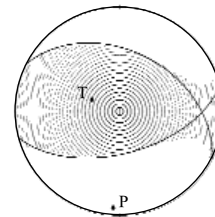
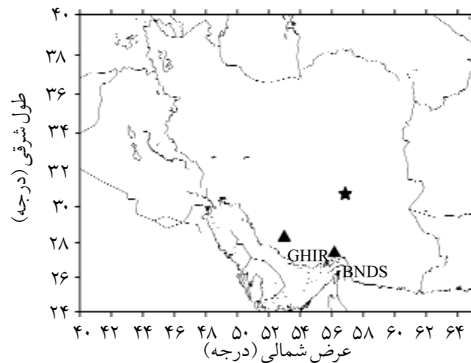
شکل (۲): نتایج واژگونی موج نقشهای ثبت شده در ایستگاههای کاوش و بندرعباس (مثلث نوپر) از زمین لرزه ۲۰۰۴/۱۰/۷ در منطقه مرزی ایران- ترکمنستان (سناره)

NORTHERN AND CENTRAL IRAN

Date: 2005/5/14 Centroid Time: 18:4:58.4 GMT
 Lat = 30.72 Lon = 56.84
 Depth = 12.0 Half duration = 1.0
 Centroid time minus hypocenter time: 3.3
 Moment Tensor: Expo=24 0.614-0.982-0.368-0.011 0.267-0.190 Mw = 5.2 mb = 5.5 Ms = 4.8 Scalar = 9e+23
 Fault plane: strike = 69 dip = 53 slip = 46
 Fault plane: strike = 307 dip = 55 slip = 133



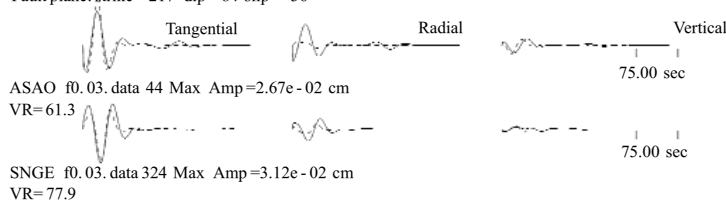
Strike = 75; 298
 Rake = 63; 124
 Dip = 57; 42
 Mo = 9.46 e + 23
 Mw = 5.3
 Percent DC = 79
 Percent CLVD = 21
 Percent ISO = 0
 Variance = 7.44 e - 09
 Var. Red = 7.23 e + 01
 RES/Pdc. = 9.38 e - 11



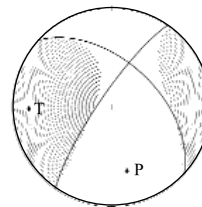
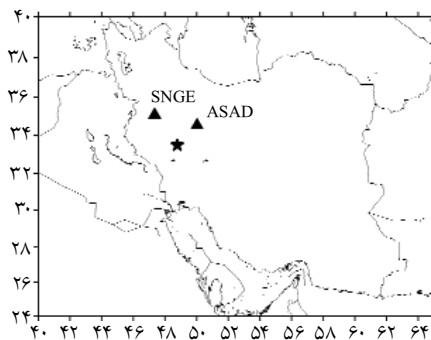
شکل (۳): نتایج واژگونی موج نقشهای ثبت شده در پایگاههای قیر و بندرعباس از زمین لرزه ۲۰۰۵/۵/۱۴ به بزرگای گشتاوری $M_w = 5.2$ واقع در حاشیه کویر لوت. \star = رو مرکز زمین لرزه \blacktriangle = پایگاههای مورد استفاده

WESTERN IRAN

Date: 2006/3/31 Centroid Time: 1:17:10.8 GMT
 Lat = 33.69 Lon = 48.78
 Depth = 12.0 Half duration = 2.7
 Centroid time minus hypocenter time: 8.8
 Moment Tensor: Expo=25 -0.249-1.160-1.410-0.607 0.699-0.249 Mw = 6.1 mb = 5.7 Ms = 5.7 Scalar = 1.62e+25
 Fault plane: strike = 311 dip = 54 slip = -172
 Fault plane: strike = 217 dip = 84 slip = -36



Strike = 214; 313
 Rake = -39; -167
 Dip = 80; 52
 Mo = 1.21 e + 25
 Mw = 6.0
 Percent DC = 63
 Percent CLVD = 37
 Percent ISO = 0
 Variance = 8.16 e - 06
 Var. Red = 7.14 e + 01
 RES/Pdc. = 1.29 e - 07



شکل (۴): نمایش نتایج واژگونی موج نقشهای ثبت شده در پایگاههای آشتیان (ASAO) و سنندج (SNGE) از زمین لرزه ۲۰۰۶/۳/۳۱ به بزرگای $M_p = 5.7$ واقع در غرب ایران. \star = رو مرکز زمین لرزه \blacktriangle = پایگاههای مورد استفاده

Date: 2005/11/27 Centroid Time: 10:22:22.7 GMT

Lat = 26.66 Lon = 55.80

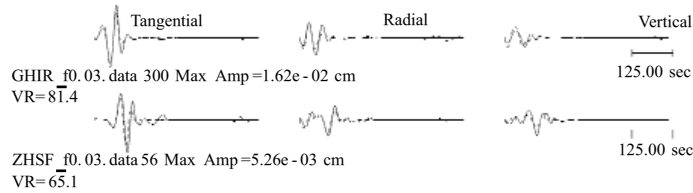
Depth = 12.0 Half duration = 2.3

Centroid time minus hypocenter time: 3.5

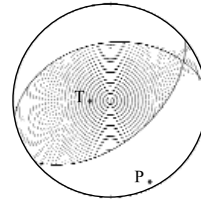
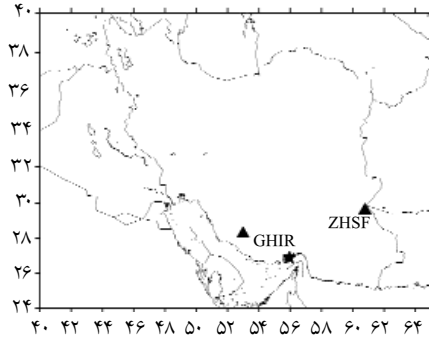
Moment Tensor: Expo=25 0.952-1.030 0.076-0.226-0.040-0.165 Mw=5.9 mb=6.1 Ms=5.8 Scalar=1.03e+25

Fault plane: strike=257 dip=39 slip=83

Fault plane: strike=86 dip=51 slip=96



Strike = 51; 261
 Rake = 71; 115
 Dip = 54; 40
 Mo = 1.41 e+25
 Mw = 6.1
 Percent DC = 95
 Percent CLVD = 5
 Percent ISO = 0
 Variance = 5.67 e-07
 Var. Red = 7.86 e+01
 RES/Pdc. = 5.97 e-09



شکل (۵): نمایش نتایج وارونگی موج نقشه‌های ثبت شده در پایگاه‌های قیر (GHIR) و زاهدان (ZHSF) از زمین‌لرزه ۲۰۰۵/۱۱/۲۷ با بزرگای گشتاوری $M_w=5.9$ واقع در حوالی جزیره قشم. ★ = رو مرکز زمین لرزه ▲ = پایگاه‌های مورد استفاده

۶- نتیجه‌گیری

در بررسی‌های انجام شده بر روی چهار زمین‌لرزه، درصد بالای مؤلفه زوج دوتایی مشاهده شده است. این مسأله نمایانگر زمین‌ساختی بودن آنها و عمق کم و سازوکار کانونی نسبتاً ساده می‌باشد. این در حالی است که زمین‌لرزه‌های بزرگ و با پیچیدگی کانونی که دارای عمق زیاد هستند مؤلفه CLVD از درصد بالا برخوردار است.

از آنجایی که آگاهی دقیق از مدل پوسته در فلات ایران که نقش اساسی در موفقیت مدل‌سازی موج نقش دارد، وجود نداشته است، سعی شده که امواج در حوزه فرکانسی ۰/۱ تا ۰/۳ هرتز مدل‌سازی شوند تا بدین ترتیب مدل پوسته‌ای، کلی و فاقد جزئیات جوابگوی مطالعات حاضر باشد. بدیهی است برای دستیابی به نتایج بهتر و کاهش خطای مدل‌سازی، نیاز به مدل‌های دقیق‌تر و جزئی‌تر و چه بسا مدل‌هایی خاص برای نواحی مختلف ایران است.

نتایج مدل‌سازی چهار زمین‌لرزه، نشان از همخوانی خوب موج نقشه‌های مشاهده و محاسبه شده و همخوانی با نتایج ارائه شده توسط دانشگاه هاروارد دارد. از آنجایی که با این روش تمامی موج نقش مدل‌سازی می‌شود، حتی با تعداد محدودی پایگاه، دستیابی به پارامترهای سازوکار کانونی مقدور است. چنین قابلیت‌هایی از آنجا مهم است که زمین‌لرزه‌های کوچک عموماً توسط تعداد محدودی پایگاه در فواصل ناحیه‌ای به ثبت می‌رسند و با به کار بردن این روش، می‌توان سازوکار کانونی آنها را تعیین نمود.

توانایی در حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های کوچک و متوسط در فلات ایران بویژه در مناطقی که به علت فقدان زمین‌لرزه‌های بزرگ حل سازوکار دور لرزه‌ای در دسترس نیست، اهمیت خود را در تبیین رژیم لرزه‌زمین‌ساختی نشان می‌دهند.

در این مطالعه، مدلسازی برای اعماق ارائه شده توسط دانشگاه هاروارد انجام شده است. با تغییر عمق می توان مدلسازیهای انجام گرفته را تکرار نمود و عمقی را که حداکثر کاهش واریانس را به دست می دهد به عنوان عمق زمین لرزه در نظر گرفت. در مطالعات آینده تأثیر خطای مکان یابی زمین لرزه ها در پارامترهای چشمه لرزه ای بررسی خواهند شد.

۷- مراجع

1. Helmberger, D.V., Engen, G. (1980). Modeling the long-period body waves from shallow earthquakes at regional distances. *BSSA*, 70, 1699-1714.
2. Stump, B.W., Johnson, L.R. (1977). The determination of source properties by the linear inversion of seismograms. *BSSA*, 67, No. 6, 1489-1502.
3. Dreger, D. S. (2003). TDMT-INV: Time domain seismic moment tensor inversion. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, vol. 81B, p. 1627.
4. Doloei, J., Roberts, R. (2003). Crust and uppermost mantle structure of Tehran region from analysis of teleseismic P-waveform receiver functions. *Tectonophysics*, 364, 115-133.
5. Alinaghi, A., Kind, R., Sodoudi, F. (2003). Receiver function probing of the crust in Northern Iran. *Abstract, AGU Fall Meeting*. San Francisco, USA. ◀