

تعیین جهت‌یافتگی نوفه لرزه‌ای محیطی در منطقه البرز مرکزی / ایران با استفاده از تابع‌های همبستگی

تقی شیرزاد^{۱*} و ظاهر حسین شمالی^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، گروه فیزیک، دماوند، ایران

^۲ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۵/۵)

چکیده

امروزه با به‌کارگیری نوفه لرزه‌ای محیطی، مجموعه بزرگی از داده‌ها در راستای تعیین تصاویر توموگرافی با کیفیت بالا در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای، حتی در مناطقی با لرزه‌خیزی کم، فراهم شده است. پیش از استفاده از تابع‌های گرین تجربی بین‌ایستگاهی حاصل از همبستگی نوفه‌های لرزه‌ای لازم است که توزیع فضایی و زمانی نوفه لرزه‌ای بررسی شود. در این تحقیق جهت‌یافتگی نوفه لرزه‌ای در البرز مرکزی/ایران با استفاده از داده‌های پیوسته سه مولفه‌ای دائم ثبت شده در ۳۰ ایستگاه لرزه‌نگاری با حس‌گرهای متفاوت عرضه می‌شود. همچنین برای تعیین تابع‌های گرین تجربی بین‌ایستگاهی فقط از همبسته‌ساختن نوفه‌های لرزه‌ای محیطی ثبت شده در ایستگاه‌هایی با حس‌گر مشابه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۶۸٪ و ۶۴٪ انرژی سیگنال‌های امواج به‌ترتیب لاو و ریلی سال ۲۰۱۰ در همه سمت (آزیموت)ها در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه توزیع می‌شود. بررسی توزیع ماهیانه سیگنال‌ها نشان می‌دهد که حداقل ۴۵٪ و ۵۰٪ انرژی سیگنال‌های به‌ترتیب لاو و ریلی در همه ماه‌های سال ۲۰۱۰ در همه سمت‌ها در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه توزیع شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: نوفه لرزه‌ای، تابع‌های گرین تجربی، جهت‌یافتگی، البرز مرکزی

Determination of ambient seismic noise directionality in the Central-Alborz/Iran using cross-correlation functions

Taghi Shirzad^{1*} and Zaher Hossein Shomali²

¹Department of Physics, Damavand branch, Islamic Azad University, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 2 November 2013, accepted: 27 July 2014)

Summary

Recent progress in seismology has demonstrated that empirical Green's functions (EGFs) of inter-station distances can be extracted using cross correlation of ambient seismic noise recorded in the similar time at two stations (Weaver and Lobkis, 2002; Shapiro and Compillo, 2004; Wapenaar, 2004). Consequently, this method provides a great set of data even in low seismicity regions to apply in the tomographic studies. Thus, the resulted tomographic images using the ambient seismic noise method (hereafter ANT) can show interior earth structures with a higher resolution compared to classical tomography

*Corresponding author:

t.shirzad@srbiau.ac.ir

*نگارنده رابط:

methods (Shapiro et al, 2005; Lin et al., 2007; Shirzad et al, 2013).

Diffused signals are the main assumption in the ANT method (Snider, 2004). Ambient seismic noise sources generate a coherent and transient noise wavefield with random amplitude and phase in a medium (Van-Tighelen, 2003; Gorin et al., 2006). Reconstruction of the propagating path information using the amplitude of the recorded noise wavefield is impossible, but coherent information provided by propagating path can be extracted using cross correlation of long time ambient seismic noise recorded (Weaver and Lobkis, 2004; Gorin et al., 2006). This coherent information is called elastic response of medium or empirical Green's functions (Shapiro and Compillo, 2004; Roux et al., 2005; Sabra et al., 2005).

Generally, the ambient seismic noise recorded for each station is composed of surface waves (Rayleigh and Love) with random amplitude and phase (Aki and Richards, 1980). Cross correlation function of these data will be symmetric if the ambient seismic noise wavefields generated by random sources are distributed uniformly (Snider, 2004). Earth structures can be studied using travel-time of extracted EGFs such as Rayleigh wave fundamental mode (Shapiro et al., 2005). Some studies (e.g. Stehly et al., 2006; Pedersen et al., 2007) indicate that the inhomogeneous distribution of the signal energy in various azimuths, which results in directionality of ambient seismic noise, produces deviation in tomography results and causes incorrect interpretations. Consequently, optimization of extracted tomographic maps based on the ANT method needs comprehensive knowledge of spatial and seasonal distribution of the noise wavefield in study areas (Stehly et al., 2006; Pedersen et al, 2007).

Gutenberg (1936) suggested that the sources of primary and secondary oceanic microseisms observed throughout the Europe are located in the northeastern Atlantic Ocean. Primary and secondary microseisms dominate the noise wavefield in certain frequency ranges. The interaction between the swell and the sea bottom generates the primary microseisms which are dominated by periods of 12–25 s. Also, interfering water wavefield components travelling in opposite directions generate the secondary microseisms which are dominated by periods of 5-10 s (Gutenberg, 1936).

In this study, we analyzed three-component recordings of continuous data from 30 stations in the Central Alborz region depicted in Figure 1. The Alborz Mountain range in the southern margin of the Caspian Sea is a part of the Alpine–Himalayan orogenic belt. The Alborz Mountain range resulted from a stress state derived from the horizontal compressive forces of the Central Iran Plateau has been induced by the collision of the Arabian plateau and the Asian continent (Berberian and King, 1981; Zanchi et al., 2006). The dataset used in this study consisted of 10 digital accelerometers with CMG-5TD sensors operated by the Tehran Disaster Mitigation and Management Organization (TDMMO), 18 digital narrow-band seismometers with SS1 seismometer sensors (corner frequency ≥ 1 Hz) operated by the Iranian Seismological Center (IRSC) at the University of Tehran, and two digital broadband instruments with a CMG-3T sensor operated by the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES). For the TDMMO acceleration network, the IRSC and the IIEES seismic networks continuous data from 2010 were analyzed.

In the case of azimuthal distribution of the ambient noise, normalized amplitude of the cross-correlations versus azimuth (rose-diagram) constrained the direction to the sources of the ambient seismic noise, based on all available station-pairs. The average fractions (the number of Love/Rayleigh path with a $SNR > 10$ in a given 20° azimuthal bin was normalized to the total number of Love/Rayleigh paths in that given bin) of the Love and Rayleigh yearly empirical Green's functions with a $SNR > 10$ were in the orders of 0.78 and 0.73, respectively, at the period band of 1–10 s. Our final results indicated that the

average fractions per cent of Love and Rayleigh paths with $SNR > 10$ were above 68% and 64% on a yearly scale, and never decreased to 45% and 50% on a monthly scale at the period band of 1-10 s, respectively.

Keywords: Ambient seismic noise, empirical Green's functions, directionality, Central Alborz

۱ مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زلزله‌شناسی نشان داده است که می‌توان با استفاده از داده‌های نوفه لرزه‌ای که در زمان‌های یکسان در دو ایستگاه ثبت شده، تابع‌های گرین تجربی (empirical Green's function) محیط را برای فواصل بین جفت‌ایستگاهی تعیین کرد (ویور و لابیکیس، ۲۰۰۲؛ شاپیرو و کمیلو، ۲۰۰۴؛ وینار، ۲۰۰۴). این روش، مجموعه بزرگی از داده‌ها را فراهم می‌آورد که ما را قادر به تحقیقات توموگرافی در مناطقی با لرزه‌خیزی کم می‌کند. بنابراین، تصاویر توموگرافی حاصل از این روش می‌تواند ساختار درونی زمین را با تفکیک‌پذیری بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک توموگرافی نشان دهد (شاپیرو و همکاران، ۲۰۰۵؛ لین و همکاران، ۲۰۰۷؛ شیرزاد و همکاران، ۲۰۱۳).

فرض اساسی در این روش، کاتوره‌ای بودن میدان‌های موج ثبت شده است (اشنایدر، ۲۰۰۴). چشمه‌های نوفه‌های لرزه‌ای، میدان‌های همدوس و گذرایی با دامنه و فاز کاتوره‌ای در محیط تولید می‌کنند (ون-تیگلن، ۲۰۰۳؛ گورین و همکاران، ۲۰۰۶). بازسازی اطلاعات حاصل از مسیر این نوفه‌های عبوری از محیط با استفاده از دامنه امواج ثبت شده تقریباً غیر ممکن است، اما اطلاعات همدوس مسیر نوفه عبوری از محیط را می‌توان با استفاده از همبسته ساختن (cross-correlation) میدان‌های کاتوره‌ای ثبت شده طولانی‌مدت، به صورت ویژگی‌های مسیر انتشار به دست آورد (ویور و لابیکیس، ۲۰۰۴؛ گورین و همکاران، ۲۰۰۶). این ویژگی‌های مسیر انتشار را پاسخ کشسان محیط یا تابع‌های گرین تجربی بین‌ایستگاهی می‌گویند (شاپیرو و همکاران، ۲۰۰۴؛

رائوکس و همکاران، ۲۰۰۵؛ ساپرا و همکاران، ۲۰۰۵). امواج نوفه لرزه‌ای ثبت شده در ایستگاه‌ها، عموماً حاصل ترکیب امواج سطحی (ریلی و لاو) با دامنه و فاز کاتوره‌ای هستند (آکی و ریچارد، ۱۹۸۰). اگر میدان‌های نوفه لرزه‌ای محیطی حاصل از چشمه‌های کاتوره‌ای به اندازه کافی پراکنده شده باشند، تابع‌های همبسته شده آنها متقارن است (اشنایدر، ۲۰۰۴)، و می‌توان با استفاده از زمان عبور این تابع‌های همبستگی حاصل همانند مُد پایه موج ریلی، ساختار منطقه مورد تحقیق را بررسی کرد (شاپیرو و همکاران، ۲۰۰۵). وجود جهت‌یافتگی‌های شدید در توزیع فضایی نوفه لرزه‌ای، که ناشی از توزیع غیریکنواخت انرژی سیگنال در سمت‌های (Azimuths) متفاوت است، باعث انحراف نتایج توموگرافی و همچنین تفسیر نادرست این نتایج می‌شود. همچنین با بررسی توزیع زمانی نوفه لرزه‌ای می‌توان مدت زمان داده ثبت شده لازم برای تعیین تابع‌های گرین، با نسبت سیگنال به نوفه (signal-noise ratio; SNR) بالا، را به دست آورد. (استحلی و همکاران، ۲۰۰۶؛ پدرسن و همکاران، ۲۰۰۷).

گوتبرگ نشان داد که خُردلرزه‌های (microseism) اقیانوسی اولیه و ثانویه که در اروپا مشاهده می‌شوند از مناطق کوچکی از شمال شرقی اقیانوس اطلس منشأ می‌گیرند. خُردلرزه‌های اولیه با برهم‌کنش غیرخطی امواج خیزاب (swell) با کف دریا به وجود می‌آید و طیف آن مستقیماً طیف تناوبی امواج آب را نشان می‌دهد، که در بازه ۱۲-۲۵ ثانیه غالب است. خُردلرزه‌های ثانویه که در حیطه دومین بسامد غالب امواج آب است از تداخل عبور مولفه‌های میدان‌های آب در جهت‌های مخالف به وجود می‌آید. این خُردلرزه‌های ثانویه که در

IIEES دارای ایستگاه سرعت‌نگار نواریپهن با ۲ حس‌گر CMG-3T شرکت GURALP و شبکه IRSC دارای ۱۸ ایستگاه سرعت‌نگار دوره کوتاه با حس‌گر SS1 در سطح منطقه مورد بررسی است. بازه زمانی داده‌های مورد استفاده برای شبکه TDMMO از مهرماه ۱۳۸۸ تا اردیبهشت ۱۳۹۰ (از اکتبر ۲۰۰۹ تا مه ۲۰۱۰) و همچنین برای شبکه IRSC و IIEES از دی ۱۳۸۸ تا دی ۱۳۸۹ (سال ۲۰۱۰) است.

منطقه مورد بررسی که در شکل ۱ مشخص شده، در پهنه البرز مرکزی است. این پهنه در شمال به فروافتادگی خزر و در جنوب به فلات ایران مرکزی منتهی می‌شود. از عوامل شکل‌گیری این منطقه می‌توان به برخورد صفحه ایران - عربستان، عملکرد گسلش‌های راندگی و در ادامه عملکرد گسلش‌های امتدادلغز اشاره کرد (میرزایی، ۱۹۹۸). این منطقه در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتر از دریاچه خزر و در فاصله ۱۵۰۰ کیلومتر از دریاچه آزاد (خلیج فارس)، به عنوان چشمه‌های نوفه لرزه‌ای، قرار دارد. لذا بررسی جهت‌یافتگی توزیع فضایی و زمانی نوفه لرزه‌ای در منطقه مورد بررسی، امری اجتناب‌ناپذیر است. همچنین، کلان‌شهر تهران، در نقش پایتخت سیاسی و اقتصادی، و کرج در حاشیه جنوبی این پهنه واقع شده است.

بازه تناوبی ۵-۱۰ ثانیه دیده می‌شوند، دارای دامنه‌های بزرگ‌تری از خردلرزه‌های اولیه هستند (گوتنبرگ، ۱۹۳۶). یکی از مهم‌ترین هدف‌های این تحقیق، درک بهتر توزیع فضایی و زمانی انرژی سیگنال‌های نوفه لرزه‌ای در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه (شامل خردلرزه‌های ثانویه) در گستره البرز مرکزی است. منطقه البرز مرکزی، با توجه به فاصله بسیار کم با سواحل دریای خزر (به عنوان یکی از چشمه‌های نوفه لرزه‌ای در دوره‌های مورد بررسی در این تحقیق) مستعد عدم تقارن در توزیع فضایی و زمانی نوفه‌ها است. این عدم تقارن، تاثیر مستقیمی بر نتایج و نقشه‌های توموگرافی حاصل خواهد داشت. با توجه به آنکه امروزه شاهد تحقیقات روزافزون پوسته در منطقه البرز مرکزی و به‌ویژه شهر تهران با توجه با جایگاه مهم اقتصادی و سیاسی آن هستیم (متقی و همکاران، ۲۰۱۲؛ شیرزاد و شمالی، ۲۰۱۳)، بهینه‌سازی تصاویر لرزه‌ای که براساس روش همبستگی نوفه‌های لرزه‌ای حاصل شده‌اند، نیازمند شناخت بیشتر توزیع فضایی و زمانی نوفه‌ها در منطقه مورد بررسی است. برای این منظور از چندین شبکه لرزه‌نگاری متفاوت با حس‌گرهای متفاوت در گستره مورد بررسی استفاده کرده‌ایم.

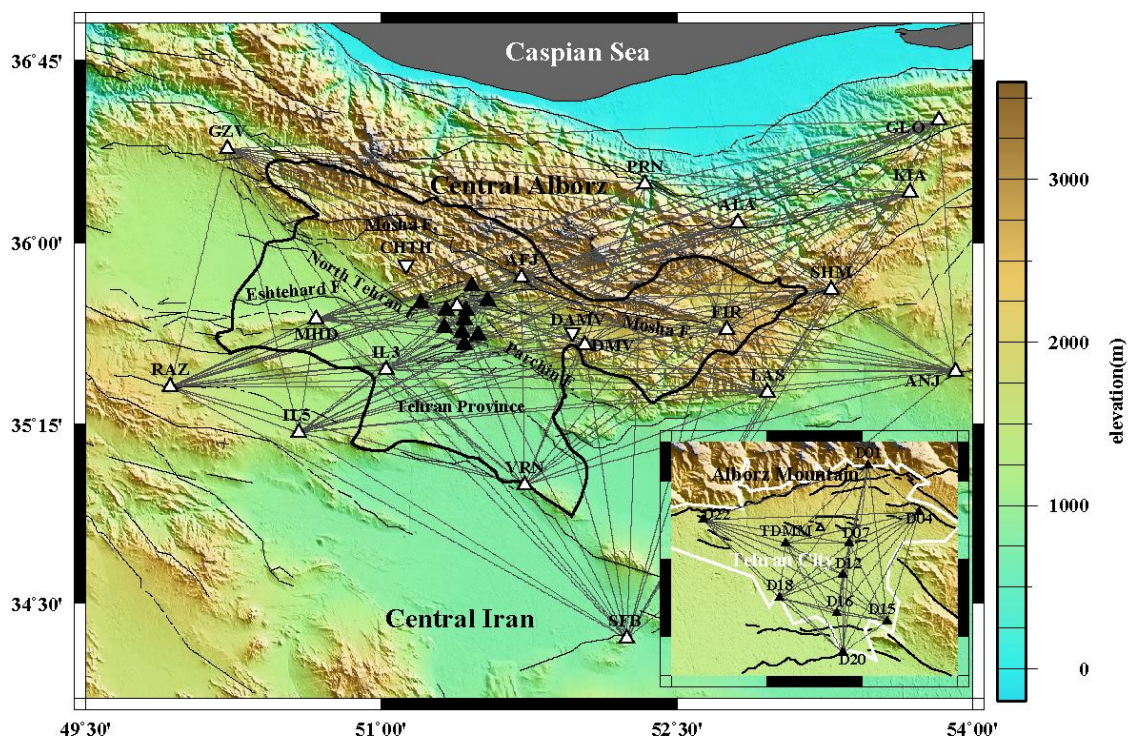
۲ روش پژوهش

۲-۱ داده‌ها و منطقه مورد بررسی

در این تحقیق از داده‌های سه مولفه‌ای پیوسته شبکه لرزه‌نگاری دائم سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDMMO)، مرکز لرزه‌نگاری کشور (IRSC) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) استفاده می‌کنیم. موقعیت ایستگاه‌های موردنظر در این تحقیق در شکل ۱ مشخص شده است. شبکه TDMMO متشکل از ۱۰ ایستگاه شتاب‌نگار پیوسته با حس‌گر CMG-5TD شرکت GURALP، همچنین شبکه

۲-۲ بازه تناوبی مورد بررسی

بازه تناوبی مورد بررسی در این تحقیق، بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه (۱/۰-۱/۰ هرتز) است. این بازه تناوبی که گستره تناوبی خردلرزه‌های ثانویه را شامل می‌شود، در حیطه بسامدهای مورد بررسی در تحقیقات پوسته قرار دارد (دروده و همکاران، ۲۰۰۴؛ بن‌سن و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۱. ایستگاه‌های مرکز لرزه‌نگاری (IRSC) با مثلث‌های سفید، ایستگاه‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) با مثلث‌های سفید برعکس و ایستگاه سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDDMMO) با مثلث‌های توپ‌ر مشکی، در منطقه مورد بررسی نشان داده شده است. گسل‌های مهم در منطقه با خط‌های سیاه باریک و محدوده استان تهران با خط توپ‌ر سیاه نشان داده شده است. شکل کوچک داخل منطقه مورد بررسی ایستگاه‌های شبکه TDDMMO را در شهر تهران نشان می‌دهد. همچنین محدوده شهر تهران با خط سفید مشخص شده است. همه جفت‌ایستگاه‌های ممکن با خط‌های خاکستری نشان داده شده است.

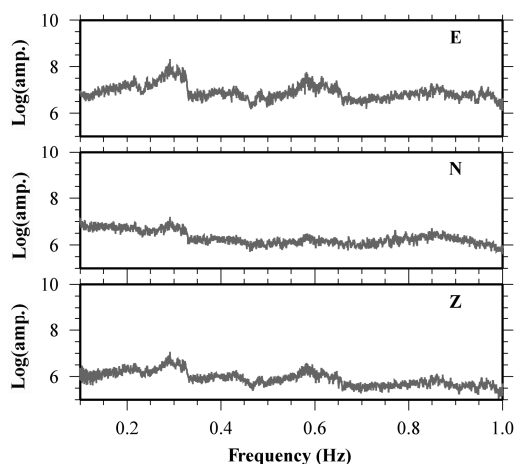
همکاران، ۲۰۱۳). برای تعیین مولفه‌های شعاعی (radial) و مماسی (tangential) نوفه‌های پنجره‌ای ۱۰ دقیقه‌ای، ماتریس عرضه شده لین و همکاران (۲۰۰۸) را بر مولفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی (E, N) اعمال می‌کنیم. سپس پنجره زمانی مرتبط با مولفه‌های قائم، شعاعی و مماسی را در حوزه زمان نرمال (time domain normalization) و در حوزه بسامد سفید (frequency domain whitening) اعمال می‌کنیم. این فرایند، به منظور جلوگیری از تاثیر رویدادهای پُرانرژی مانند زمین‌لرزه‌ها و بسامدهای غالب ناشی از این رویدادهای پُرانرژی روی تابع‌های گرین حاصل است. برای اجرای فرایند نرمال کردن در حوزه زمان، دامنه‌های مثبت سیگنال‌های پنجره‌ای را به عدد +۱ و دامنه‌های منفی را به عدد -۱ تغییر

شکل ۲ مثالی از لگاریتم طیف دامنه سه مولفه (E,N,Z) نوفه لرزه‌ای محیطی در ایستگاه DMV از ایستگاه‌های شبکه IRSC در بازه تناوبی موردنظر را نشان می‌دهد.

۲-۳ آماده‌سازی و همبسته ساختن داده و استخراج تابع‌های گرین تجربی

برای آماده‌سازی داده‌های همه ایستگاه‌ها، از روش عرضه شده بن سن و همکاران (۲۰۰۷)، و همچنین لین و همکاران (۲۰۰۸) شامل حذف روند روزانه، حذف مقدار میانه و کاهش زمان نمونه‌برداری به ۱۰ نمونه بر ثانیه استفاده می‌کنیم. سپس داده‌های حاصل را به پنجره‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم می‌کنیم (چو و همکاران، ۲۰۰۷؛ شیرزاد و

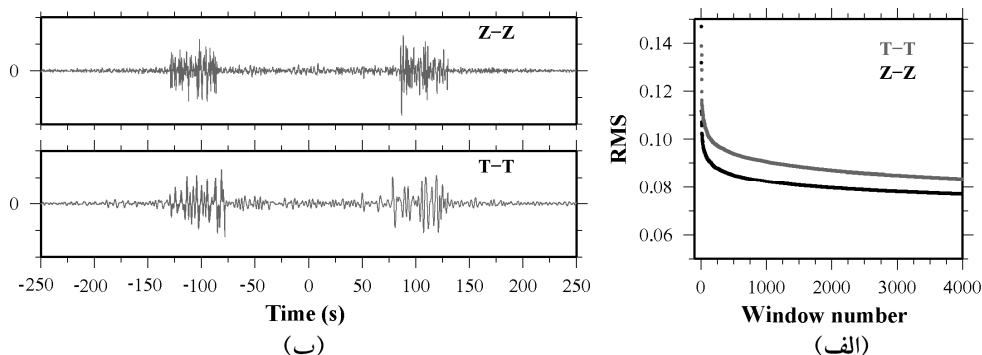
همبستگی حاصل را روی هم برانباشت می‌کنیم. در این روش، ابتدا در بازه زمانی (متناسب با بازه سرعتی ۰/۵- km/s $\sqrt{2}$) که انتظار داریم امواج سطحی وجود داشته باشند، مقدار جذر میانگین مربعات (root-mean square; RMS) هریک از تابع‌های همبستگی حاصل را محاسبه می‌کنیم. در گام بعد، تابع‌های همبستگی حاصل را براساس مقادیر جذر میانگین مربعات آنها مرتب می‌کنیم. سپس این مقادیر جذر میانگین مربعات مرتب شده را رسم می‌کنیم. شکل ۳-الف مثالی از منحنی - جذر میانگین مربعات (RMS-curve) برای مولفه‌های مماسی - مماسی و قائم - قائم در جفت‌ایستگاه DMV-FIR را نشان می‌دهد. تغییر در شیب منحنی - جذر میانگین مربعات تابع‌های همبستگی (آستانه) موردنیاز برای فرایند برانباشت را به دست می‌دهد. این آستانه برای مولفه مماسی - مماسی جفت‌ایستگاه DMV-FIR تعداد ۲۰۰۰ تابع همبستگی و برای مولفه قائم - قائم جفت‌ایستگاه DMV-FIR تعداد ۲۲۰۰ تابع همبستگی است. همچنین، بعد از افزودن هر تابع همبستگی به تابع برانباشت پیشین، باید مقدار جذر میانگین مربعات برای تابع برانباشت حاصل همواره روند افزایشی داشته باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار آستانه در جفت‌ایستگاه‌های متفاوت در



شکل ۲. لگاریتم طیف دامنه سه مولفه (E,N,Z) داده‌های نوفه لرزه‌ای بدون حذف اثر دستگاهی در ایستگاه لرزه‌نگاری DMV از ایستگاه‌های شبکه IRSC که در بازه زمانی مارس ۲۰۱۰ ثبت شده است.

می‌دهیم. همچنین برای اجرای فرایند سفید کردن در حوزه بسامد، دامنه‌های سیگنال پنجره‌ای در حوزه بسامد را نرمال می‌کنیم. سپس مولفه‌های قائم - قائم (Z-Z) و مماسی - مماسی (T-T) داده‌های آماده شده که دارای حس گر مشابه هستند را با یکدیگر همبسته می‌سازیم. به علت انجام فرایند همبستگی بین داده‌های آماده شده با حس گر مشابه، نیازی به تصحیح پاسخ دستگاهی نیست (چو و همکاران، ۲۰۰۷).

با استفاده از برانباشت به روش جذر میانگین مربعات (RMS-stacking)، عرضه شده پیکوزو و همکاران (۲۰۰۹) و تعمیم یافته شیرزاد و شمالی (۲۰۱۳)، تابع‌های



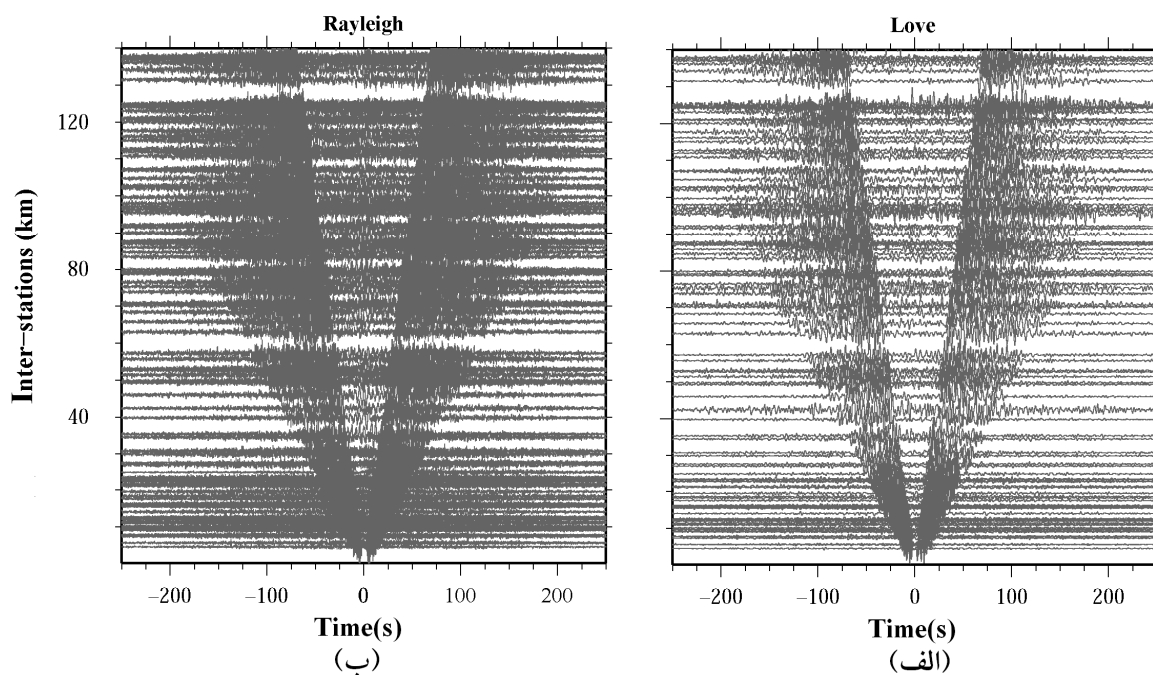
شکل ۳. الف) منحنی جذر میانگین مربعات (RMS-curve) جفت‌ایستگاه DMV-FIR برای مولفه مماسی - مماسی (T-T) و قائم - قائم (Z-Z). ب) تابع‌های گرین تجربی متناسب با این منحنی جذر میانگین مربعات در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه را نشان می‌دهد.

(km/s) تعریف می‌شود.

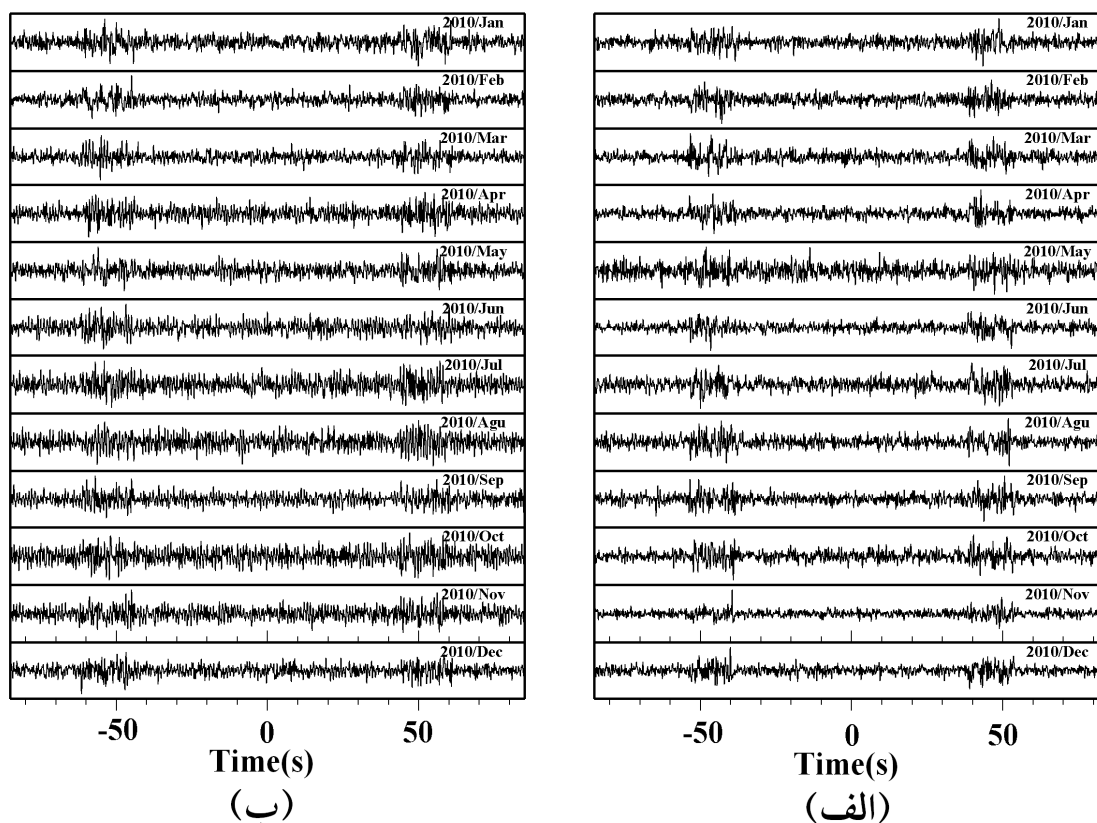
۲-۴ جهت‌یافتگی (directionality) سیگنال‌ها

اشنايدر (۲۰۰۴)، وینار (۲۰۰۴) به‌لحاظ نظری و همچنین استحلی و همکاران (۲۰۰۶)، پدرسن و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات مربوط روشن ساختند که فرض اساسی در تحقیقات تابع‌های گرین تجربی محیط، توزیع فضایی همسانگرد با سمت چشمه‌های نوفه لرزه‌ای در محیط است. به‌عبارتی هر تغییری در توزیع فضایی چشمه‌ها، تغییر در اندازه دامنه‌های تابع‌های گرین تجربی (انرژی سیگنال) در سوی‌های (lag) مثبت (جهت مثبت محور زمان در شکل ۳-ب) و منفی (جهت منفی محور زمان در شکل ۳-ب) ایجاد می‌کند. همچنین تحقیقات استحلی و همکاران (۲۰۰۶) و همچنین پدرسن و همکاران (۲۰۰۷) نشان می‌دهد که، تغییرات زمانی (فصلی، ماهانه و مانند آن) در توزیع چشمه‌ها نیز می‌تواند روی اندازه دامنه‌های

مولفه‌های مماسی-مماسی کمتر از مقدار آستانه در مولفه‌های قائم-قائم است. راثوکس و همکاران (۲۰۰۵) و همچنین سابرا و همکاران (۲۰۰۵) روشن ساختند که مقادیر منفی مشتق زمانی تابع‌های برانباشت شده هر جفت‌ایستگاه معادل با تابع‌های گرین تجربی در فاصله بین دو جفت‌ایستگاه است. لذا از همه تابع‌های برانباشت حاصل مشتق زمانی می‌گیریم. شکل ۳-ب تابع‌های گرین تجربی مولفه‌های مماسی-مماسی و قائم-قائم در جفت‌ایستگاه DMV-FIR را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ تابع‌های گرین تجربی با فاصله بین‌ایستگاهی کمتر از ۱۴۰ کیلومتر در بازه تناوبی مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نسبت سیگنال به نوفه در مولفه قائم-قائم کمتر از نسبت سیگنال به نوفه در مولفه مماسی-مماسی است. نسبت سیگنال به نوفه به‌صورت نسبت بیشینه دامنه پوش موج در پنجره سیگنال (در بازه سرعتی 0.5-1.2 km/s) به مقدار جذر میانگین مربعات در پنجره نوفه (در بازه سرعتی 0.2-0.4



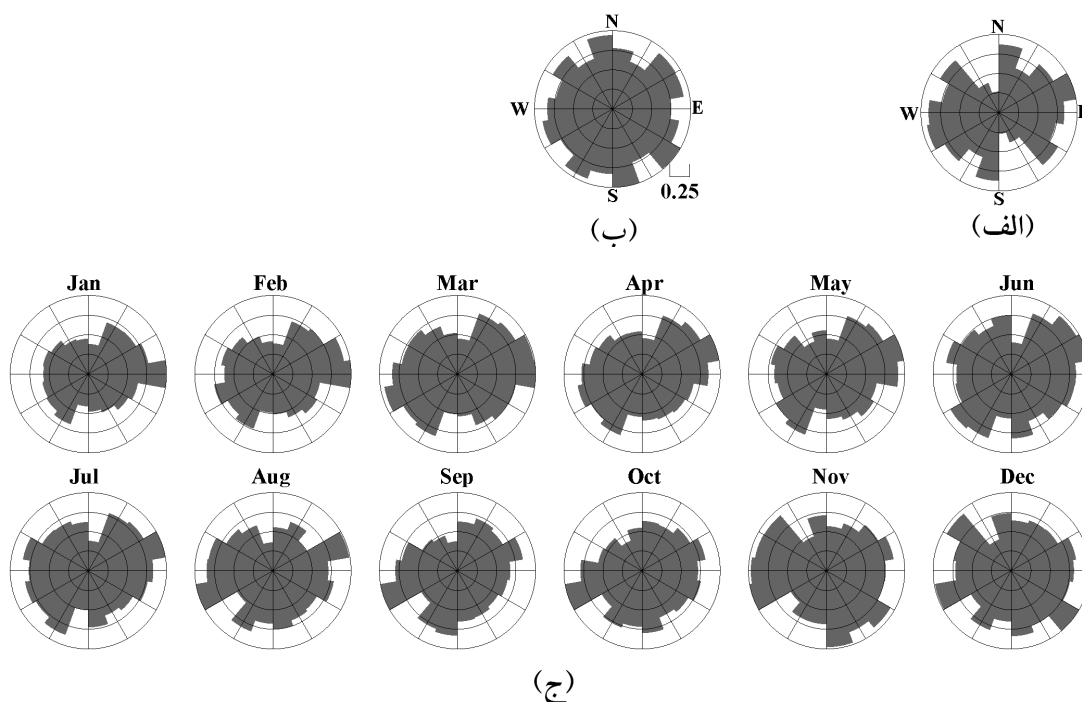
شکل ۴. تابع‌های گرین تجربی (الف) امواج لاو و (ب) امواج ریلی در منطقه مورد بررسی. سرعت گروه متوسط امواج لاو و ریلی به ترتیب ۱/۱ و ۰/۹۵ km/s در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه است.



شکل ۵. تابع‌های گرین تجربی ماهیانه نرمال شده (الف) امواج لاو و (ب) امواج ریلی مربوط به جفت‌ایستگاه D04-D22.

جهت‌یافتگی نوفه لرزه‌ای امری اجتناب‌ناپذیر است. لین و همکاران (۲۰۰۸) با کمک روش سه ایستگاهی با اندازه‌گیری‌های فاز اولیه (initial phase) نشان دادند که در بازه تناوبی مورد بررسی آنها (۶-۴۰ ثانیه) نوفه لرزه‌ای در غرب آمریکا توزیع یکنواخت سمتی دارد. در روش سه ایستگاهی، زمان سیر موج (تاخیر) بین سه جفت‌ایستگاه که تقریباً روی یک دایره بزرگ (great circle) قرار گرفته‌اند را محاسبه و سپس مقایسه می‌کنند. با استفاده از نتایج زمان‌سیر حاصل می‌توان جهت‌یافتگی، خطاهای سامان‌مند (systematic errors) و مقادیر متوسط عدم قطعیت سرعت فاز را تعیین کرد. بررسی‌های فرضی (synthetic) محققانی نظیر یانگ و ریتزولر (۲۰۰۸) نشان داد که برای توزیع همسانگرد سمتی ضعیف، انحراف سرعت فاز کمتر از ۰.۵٪ است.

تابع‌های گرین تجربی تاثیرگذار باشد. بررسی با آزمایش مصنوعی یانگ و ریتزولر (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که عدم تقارن در اندازه دامنه‌ها (بیش از ۵۰٪) در دو سوی تابع‌های گرین تجربی حاصل، احتمال تعیین دقیق مقادیر سرعت گروه/فاز منحنی‌های پاشندگی را تا ۰/۵٪ کاهش می‌دهد. همچنین توزیع نامتقارن انرژی و محتوای بسامدی نوفه‌های لرزه‌ای، منجر به تعیین منحنی‌های پاشندگی با انحرافی تا ۳٪ از مقدار واقعی می‌شود (استحلی و همکاران، ۲۰۰۶). لذا تغییرات فضایی و زمانی نوفه لرزه‌ای محیطی با سمت می‌تواند باعث انحراف منحنی‌های پاشندگی و به تبع آن نتایج تحقیقاتی، همچون توموگرافی با استفاده از نوفه لرزه‌ای محیطی (Ambient Seismic Noise Tomography; ANT) شود. بنابراین، پیش از هر تحقیق با استفاده از روش نوفه لرزه‌ای، بررسی

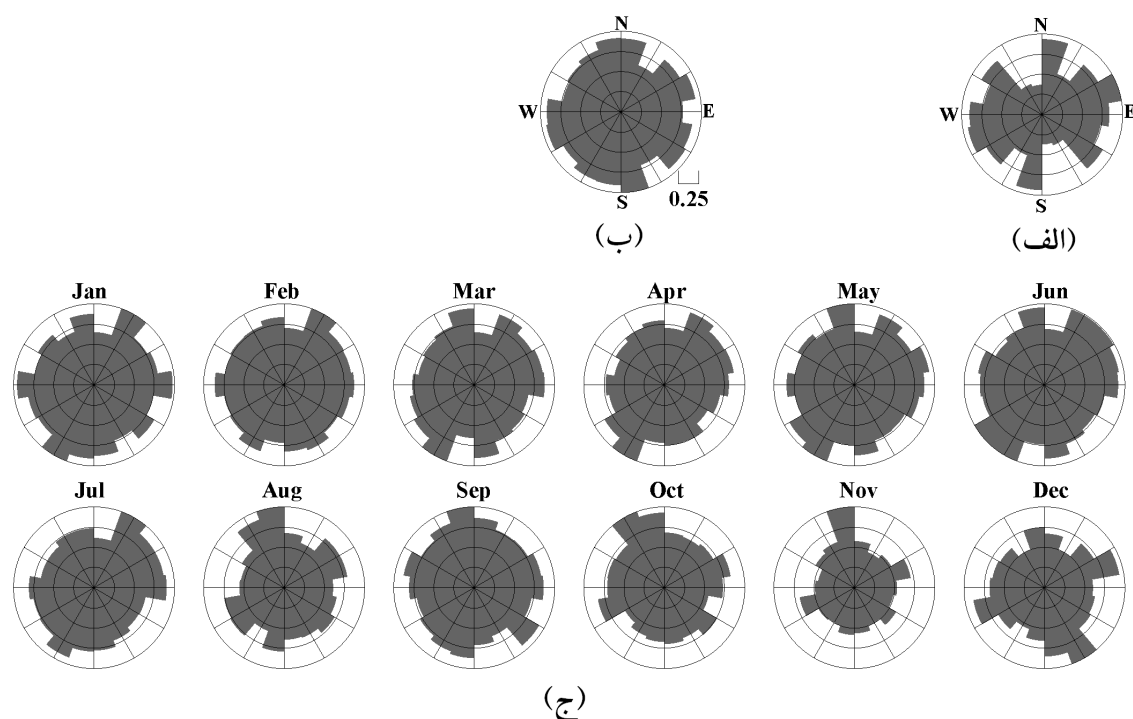


شکل ۶. الف) توزیع سمتی مسیرهای جفت‌ایستگاهی امواج لاو. ب) نمودار گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی انرژی امواج لاو. ج) نمودار گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی انرژی امواج لاو ماهیانه. در ماه‌های ژانویه و فوریه سال ۲۰۱۰ درجه همدوسی تابع‌های گرین امواج لاو ماهیانه تا ۴۵٪ کاهش می‌یابد.

نوفه لرزه‌ای، روش کسر متوسط (average fraction) عرضه شده بن‌سن و همکاران (۲۰۰۸) را به کار می‌بریم. در این بررسی‌ها از هر دو زاویه سمتی و سمت پشتی (back Azimuth) به ترتیب برای سوی مثبت و منفی سیگنال مرتبط با یک جفت‌ایستگاه استفاده می‌کنیم. بن‌سن و همکاران (۲۰۰۸) در هر خانک ۲۰ درجه‌ای، تعداد کل مسیرهای جفت‌ایستگاهی با نسبت سیگنال به نوفه بزرگ‌تر از ۱۰ ($SNR > 10$) را به تعداد کل مسیرهای جفت‌ایستگاهی ممکن (با صرف‌نظر از مقدار نسبت سیگنال به نوفه آنها) در همان خانک ۲۰ درجه‌ای تقسیم کردند تا کسر متوسط تابع‌های گرین تجربی امواج لاو (Love) و ریلی (Rayleigh) محاسبه شود. در این تحقیق با تعیین مقادیر کسر متوسط، نمودارهای گل‌سرخ‌ی (ماهیانه و سالیانه) نظیر شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب برای امواج لاو و ریلی ترسیم شده است.

برای بررسی توزیع انرژی و محتوای تناوبی نوفه با زمان، تابع‌های گرین تجربی امواج لاو و ریلی را در فواصل زمانی یک‌ماهه در بازه تناوبی مورد بررسی تعیین می‌کنیم. شکل ۵ تابع‌های گرین تجربی یک‌ماهه برای نوفه‌های لرزه‌ای ثبت شده در سال ۲۰۱۰ را در جفت‌ایستگاه D04-D22 در بازه تناوبی مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، نسبت‌های سیگنال به نوفه تابع‌های گرین ماهیانه همواره کمتر از نسبت سیگنال به نوفه تابع‌های گرین سالیانه هستند.

نمودارهای گل‌سرخ‌ی (Rose Diagram)، شکل‌های ۶-الف و ۷-الف، توزیع سمتی مسیرهای جفت‌ایستگاهی به ترتیب لاو و ریلی را با خانک‌های ۲۰ (bins) درجه‌ای نشان می‌دهد. این شکل‌ها روشن می‌سازند که توزیع سمتی جفت‌ایستگاهی غالب در راستای شرقی-غربی است. بنابراین، برای جلوگیری از غالب شدن اثر هندسه شبکه‌ها روی نمودارهای گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی انرژی



شکل ۷. (الف) توزیع سمتی مسیرهای جفت‌ایستگاهی امواج ریلی. (ب) نمودار گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی انرژی امواج ریلی. (ج) نمودار گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی انرژی امواج ریلی ماهیانه. در ماه‌های اوت و نوامبر سال ۲۰۱۰ درجه همدوسی تابع‌های گرین امواج ریلی ماهیانه تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

۳ بحث

در تحقیق حاضر با استفاده از همبسته ساختن نوفه لرزه‌ای محیطی، تابع‌های گرین تجربی امواج ریلی و لاو را در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه در منطقه البرز مرکزی تعیین کردیم (شکل ۴). تحقیقات پیشین (از جمله استحلی و همکاران، ۲۰۰۶) نشان می‌دهد که توزیع سمتی ناهمسانگرد انرژی سیگنال، باعث انحراف نتایج تحقیقاتی نظیر توموگرافی می‌شود. نمودارهای گل‌سرخ‌ی، توزیع سمتی انرژی و مقدار آن را به صورت سالیانه و ماهانه مشخص می‌سازد.

شکل‌های ۶-ب و ۷-ب نمودار گل‌سرخ‌ی توزیع سمتی به ترتیب تابع‌های گرین تجربی امواج لاو و ریلی با نسبت سیگنال به نوفه بزرگ‌تر از ۱۰ برای بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه در سال ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. نتایج روشن می‌سازد که نسبت سیگنال به نوفه تابع‌های گرین تجربی

امواج لاو و ریلی همواره به ترتیب بزرگ‌تر از ۲۵ و ۲۳ است، لذا هندسه شبکه‌های لرزه‌نگاری تاثیر بسیار ناچیزی بر نمودارهای گل‌سرخ‌ی دارد. مقدار کسر متوسط برای تابع‌های گرین تجربی امواج لاو و ریلی به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۷۳ است. در بازه تناوبی مورد بررسی، کسر تابع‌های گرین تجربی مسیرهایی با نسبت سیگنال به نوفه بزرگ‌تر از ۱۰ برای مقیاس سالانه، همواره بیش از ۶۸٪ و ۶۴٪ به ترتیب برای امواج لاو و ریلی است. لذا این شکل‌ها نشان می‌دهد که انرژی سیگنال‌های نوفه لرزه‌ای در همه سمت‌ها در بازه زمانی یک‌ساله (۲۰۱۰) توزیع می‌شود. از طرفی بیشینه مقادیر نسبت سیگنال به نوفه برای امواج لاو و ریلی ماهیانه به ترتیب ۱۹ (دسامبر ۲۰۱۰) و ۲۲ (فوریه ۲۰۱۰) است. همچنین کمینه مقادیر نسبت سیگنال به نوفه تابع‌های گرین ماهیانه برای امواج لاو و ریلی به ترتیب ۱۱ (ژانویه ۲۰۱۰) و ۱۵ (نوامبر ۲۰۱۰) است. لذا با توجه به

امواج لاو و ریلی هرگز کمتر از حداقل ۴۵٪ و ۵۰٪ نمی‌شود. با توجه به نتایج شکل‌های ۶-ب و ۷-ب و در نظر داشتن فاصله بسیار کم منطقه مورد بررسی از سواحل دریای خزر (۱۰۰ کیلومتر) و فاصله ۱۵۰۰ کیلومتر از خلیج فارس می‌توان نتیجه گرفت که جهت‌یافتگی سیگنال نوفه و توزیع سمتی انرژی در بازه تناوبی ۱ تا ۱۰ ثانیه برای داده‌های ثبت شده در سال ۲۰۱۰ بسیار کم (به ترتیب ۳۲٪ و ۳۶٪ برای امواج لاو و ریلی) است. لذا داده‌های ثبت شده در این بازه زمانی برای تحقیقات توموگرافی مناسب است. همچنین تحقیقات توموگرافی اعماق بیشتر به روش ANT، مستلزم بررسی جهت‌یافتگی سیگنال نوفه و توزیع فضایی انرژی در دوره‌های بالاتر (بزرگ‌تر از ۱۰ ثانیه) است.

تشکر و قدردانی

این مقاله با همکاری «دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، گروه فیزیک، دماوند، ایران» تهیه شده است. در این مقاله از داده‌های شبکه سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران (TDMMO)، مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) استفاده شده است. همچنین از آقای دکتر رضا حیدری (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران) به جهت برداشت داده‌های شبکه سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران کمال تشکر را داریم. از داوران گرامی و سردبیر محترم در خصوص طرح نظرات و پیشنهادات بسیار سازنده، کمال تشکر و امتنان را داریم. این توضیح نیز ضرورت دارد که شکل‌ها با استفاده از برنامه GMT (Generic Mapping Tools;) نسخه ۴.۲.۱ (وسل و اسمیت، ۱۹۹۸) رسم شده است.

پایین بودن سطح مقادیر نسبت سیگنال به نوفه در تابع‌های گرین ماهیانه، احتمال تاثیرپذیری نتایج نمودارهای گل‌سرخ از هندسه شبکه لرزه‌نگاری افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۶-ج و ۷-ج، کسر تابع‌های گرین تجربی مسیره‌ها، با نسبت سیگنال به نوفه بزرگ‌تر از ۱۰ برای مقیاس ماهیانه به ترتیب برای امواج لاو و ریلی هرگز کمتر از ۴۵٪ و ۵۰٪ نمی‌شود. همچنین شکل‌های ۶-ج و ۷-ج نشان می‌دهند که درجه همدوسی سیگنال در بعضی ماه‌ها، برای مثال ژانویه و فوریه سال ۲۰۱۰ برای تابع‌های گرین تجربی ماهانه امواج لاو و همچنین اوت و نوامبر ۲۰۱۰ برای تابع‌های گرین تجربی ماهانه امواج ریلی کاهش می‌یابد. می‌توان از ایرادات فنی و خرابی در بعضی ایستگاه‌ها (نظیر خرابی مولفه افقی ایستگاه AFJ در ژانویه ۲۰۱۰)، علاوه بر کم بودن نسبت سیگنال به نوفه، به عنوان عوامل کاهش درجه همدوسی سیگنال‌ها در شکل‌های ۶-ج و ۷-ج نام برد. خرابی و ایرادات فنی تعدادی از ایستگاه‌های منطقه مورد بررسی باعث کاهش تعداد جفت‌ایستگاه‌های دارای تابع‌های گرین تجربی می‌شود، این تعداد تاثیر مستقیمی روی مقدار کسر متوسط دارد.

۴ نتیجه‌گیری

همبستگی بین دو نوفه لرزه‌ای ثبت شده طولانی‌مدت بین دو ایستگاه، تابع‌های گرین تجربی فاصله بین‌ایستگاهی را فراهم می‌آورد. این تابع‌های گرین تجربی حاصل، از نوفه‌هایی که به‌طور کامل در محیط پراکنده (diffuse) شده، به‌دست می‌آیند. با توجه به اهمیت اثر توزیع انرژی سیگنال‌های نوفه لرزه‌ای، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که منطقه البرز مرکزی دارای درجه بزرگ همدوسی است. این مقدار حداقل ۶۸٪ و ۶۴٪ انرژی سیگنال برای امواج به‌ترتیب لاو و ریلی است. اگرچه این همدوسی سیگنال در برخی ماه‌ها کاهش می‌یابد، ولی به‌ترتیب برای

- doi: 10.1785/gssrl.83.3.498.
- Pedersen, H. A., Krüger, F., and the SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group., 2007, Influence of the seismic noise characteristics on noise correlations in the Baltic shield: *Geophys. J. Int.*, **168**(1), 197-210.
- Picozzi, M., Parolai, S., Bindi, D., and Strollo, A., 2009, Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise tomography: *Geophys. J. Int.*, **176**, 164-174, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03966.x.
- Roux, P., Sabra, K., Gerstoft, P., Kuperman, W. A., and Fehler, M. C., 2005, P-waves from cross correlation of seismic noise: *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19303, doi:10.1029/2005GL023803.
- Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A., and Fehler, M. C., 2005, Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise: *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03310, doi:10.1029/2004GL021862.
- Shapiro, N. M., and Campillo, M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise: *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L07614, doi:10.1029/2004GL019491.
- Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. H., 2005, High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise: *Science*, **307**, 1615-1618.
- Shirzad, T., and Shomali, Z. H., 2013, Shallow crustal structures of the Tehran basin in Iran resolved by ambient noise tomography: *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggt449.
- Shirzad, T., Shomali, Z. H., and Riahi, M.-A., 2013, An application of ambient noise and earthquake tomography in the Rigan area, southeast of Iran: *Seis. Res. Lett.*, **84**(6), doi:10.1785/0220130044.
- Snieder, R., 2004, Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase: *Phys. Rev. E*, **69**, 046610.
- Stehly, L., Campillo, M., and Shapiro, N. M., 2006, A study of the seismic noise from its long-range: *J. Geophys. Res.*, **111**, doi: 10.1029/2005JB004237.
- Tibuleac, I. M., Von Seggern, D. H., Anderson, J. G., and Louie, J. N., 2011, Computing Green's functions from ambient noise recorded by accelerometers and analog, broadband, and narrow-band seismometers: *Seis. Res. Lett.*, **82**, 661-675.
- Van Tighelen, B. A., 2003, Green function
- منابع
- Aki, K. and Richards, P. G., 1980, *Quantitative Seismology*: W. H. Freeman and Company.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., and Yang, Y., 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements: *Geophys. J. Int.*, **169**, 1239-1260.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., and Shapiro, N. M., 2008, Broadband ambient noise surface wave tomography across the United States: *J. Geophys. Res.*, **113**, B05306, doi:10.1029/2007JB005248.
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Can. J. Earth Sci.*, **18**, 210-265. doi:10.1139/e81-019.
- Cho, K. H., Herrmann, R. B., Ammon, C. J., and Lee, K., 2007, Imaging the upper crust of the Korean Peninsula by surface-wave tomography: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, 198 - 207.
- Drode, A., Larose, E., Tanter, M., Rosny, J., Tourin, A., Campillo, M., and Fink, M., 2004, Recovering the Green's function from field-field correlations in an open scattering medium (L): *J. Acoust. Soc. Am.*, **113**(6), 2972-2976.
- Gorin, T., Seligman, T. H., and Wear, R. L., 2006, Scattering fidelity in elastodynamics: *Physical Rev. E*, **73**, 015202.
- Gutenberg, B., 1936, On microseisms: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **26**, 111-117.
- Lin, F. -C., Moschetti, M. P., and Ritzwoller, M. H., 2008, Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps: *Geophys. J. Int.*, **173**, 281-298.
- Lin, F. C., Ritzwoller, M. H., Townend, J., and Bannister, S., 2007, Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand: *Geophys. J. Int.*, **170**(2), 649-666.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source Regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Res.*, **7**, 465-495.
- Mottaghi, A. A., Rezapour, M., and Tibuleac, I., 2012, Ambient noise Rayleigh wave shallow tomography in the Tehran Region, Central Alborz, Iran: *Seis. Res. Lett.*, **83**(3), 498-504,

- Am., **116**, 2731.
- Wessel, P., and Smith, W. H. F., 1998, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans: Am. Geophys. Un., **79**, 579.
- Yang, Y., and Ritzwoller, M. H., 2008, Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography: Geochem. Geophys. Geosyst., **9**, Q02008, doi:10.1029/2007GC001814.
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., and Sabouri, J., 2006, Inversion tectonics in central Alborz, Iran: J. Struct. Geol., **20**, 1-15.
- retrieval and time-reversal in a disordered world: Physical Rev. Lett., **91**, 243904.
- Wapenaar, C. P. A., 2004, Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation: Phys. Rev. Lett., **95**, 254-301.
- Weaver, R. L., and Lobkis, O., 2002, On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: Pulse-echo using thermal phonons: Ultrasonic, **40**, 435-439.
- Weaver, R. L., and Lobkis, O., 2004, Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function (L)": J. Acoust. Soc.