

روش بازنگری شده خودهمبستگی مکانی برای ارزیابی سرعت موج برشی

الهام شعبانی^{۱*}، نوربخش میرزائی^۲، ابراهیم حق شناس^۳ و مرتضی اسکندری قادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

^۳ استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۴ دانشیار، گروه علوم پایه مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۱۱/۲۷، پذیرش نهایی: ۸۹/۷/۲۱)

چکیده

از ثبت ارتعاشات محیطی یا میکروترمورها در سطح زمین می‌توان اطلاعات با ارزشی درباره ساختار یک‌بُعدی خاک به‌دست آورد. با فرض اینکه قسمت اعظم ارتعاشات محیطی را امواج سطحی تشکیل می‌دهند، با استفاده از خصوصیات پاشندگی امواج سطحی امکان ارزیابی سرعت موج برشی به‌صورت تابعی از عمق میسر می‌شود. بررسی میکروترمورها در ارزیابی سرعت موج برشی بر مبنای ثبت هم‌زمان آنها در آرایه‌ای از گیرنده‌ها دارای دو مرحله کلی استخراج منحنی پاشندگی (خودهمبستگی) از سیگنال‌های ثبت شده و وارون‌سازی آن برای به‌دست آوردن نیم‌رخ سرعتی است. معمولاً میکروترمورها با چندین آرایه با ابعاد گوناگون ثبت می‌شوند تا از آن منحنی‌های طیفی در باند بسامدی وسیعی به‌دست آید. روش‌های متفاوتی برای پردازش سیگنال‌های ثبت شده وجود دارد؛ در این مقاله به منظور پیدا کردن نتایج قابل اعتمادی از تحلیل میکروترمورها در ساختار کم‌عمق با استفاده از نگاشت‌های مؤلفه قائم میکروترمورهای ثبت شده در یک آرایه، ضرایب همبستگی با استفاده از روش‌های MSPAC و یک مدل جدید، که آن را روش بازنگری شده SPAC نامیده‌ایم، محاسبه شده است. هر دو روش مبتنی بر در نظر گرفتن همبستگی بین کلیه جفت ایستگاه‌های موجود در آرایه هستند و تنها تفاوت آنها این است که در مدل بازنگری شده روی همه همبستگی‌های حاصل از همه ایستگاه‌ها میانگین‌گیری می‌شود درحالی‌که در روش MSPAC جفت ایستگاه‌های دارای فواصل بین‌ایستگاهی مشابه در حلقه‌هایی دسته‌بندی می‌شوند. پس از استخراج ضرایب خودهمبستگی در هر دو مدل، با وارون‌سازی ضرایب به‌دست آمده نیم‌رخ‌های سرعت موج برشی حاصل از هر یک از مدل‌ها به‌دست آمده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش مطابقت خوبی با شرایط زیر ساختگاه دارند، ولی نیم‌رخ سرعت موج برشی حاصل از مدل بازبینی شده در اعماق کمتر از ۱۰ متر، دقت بیشتری نسبت به مدل MSPAC دارد.

واژه‌های کلیدی: ساختار سرعتی موج برشی، خودهمبستگی مکانی، ارتعاشات لرزه‌ای محیطی، امواج رایلی، وارون‌سازی، تهران

A revised spatial autocorrelation method to study shear wave velocity

Shabani, E.¹, Mirzaei, N.², Haghshenas, E.³ and Eskandari-Ghadi, M.⁴

¹ Ph. D. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

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

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

⁴ Assistant Professor, Eng. Science Dept., Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 16 Feb 2010, Accepted: 13 Oct 2010)

Abstract

Recordings of ambient noise or microtremors are increasingly used to find valuable information on soil in one dimension at a given site. Ambient vibrations, which are assumed to be mainly composed of surface waves, can be used to determine the surface wave dispersion curve in order to retrieve shear wave velocity profile. In this regard,

microtremors are usually recorded simultaneously in an array of stations and they are processed in two steps; finding the dispersion (autocorrelation) curve and then inverting it to estimate the shear wave velocity profile. Microtremors are usually recorded in various apertures in order to get the spectral curves over a wide frequency band, and different methods also exist for processing the raw signals.

The two most popular microtremor processing techniques are frequency-wave number (F-K) and spatial autocorrelation (SPAC). The SPAC method, which generally employs a circular array of stations and one central station, permits an in-depth understanding of the temporal and spatial spectra of seismic waves. Nowadays, it is widely used to estimate the structure of sub-surface layers and the shear wave velocities of sediments. In the SPAC method, the dispersion curves (phase velocity versus frequency) of surface waves are deduced by analyzing the normalized correlations between microtremors recorded at different stations. The dispersion curves are then used to characterize the structure of the medium. The method is based on a statistical analysis of the observed signal, which is assumed to be stationary and ergodic in time and space.

In this paper to find reliable results in the processing of microtremors in shallow structures, the spatial autocorrelation coefficients are calculated for the vertical components of recorded signals using the MSPAC method and a new one (the revised SPAC method). Both methods are based on considering all possible autocorrelation pairs among the circumference stations. Their difference is that the new model considers all possible autocorrelation pairs among the circumference stations and makes an average on the calculated autocorrelations, on the other hand in the MSPAC model the pairs are put in different rings according to the distance between each pair. The deduced autocorrelation coefficients are then inverted. The results of applying the two models on real data are presented and compared. This comparison reveals that the results of both models are in good agreements with the site geology, although the new method expresses the Vs profile at depths smaller than 10 meters more successfully than the MSPAC method.

Key words: Shear wave velocity structure, SPAC coefficient, Seismic ambient vibrations, Rayleigh waves, Inversion, Tehran

۱ مقدمه

مخرب مانند حفر گمانه‌ها یا آزمایش‌های نفوذ استاندارد باشد (گارسیا جرز و همکاران، ۲۰۰۸).
 دو روش پُر کاربرد تحلیل آرایه‌ای ارتعاشات محیطی (میکروترمورها) عبارت‌اند از روش‌های بسامد-عدد موج (F-K)، (لاکوس و همکاران، ۱۹۶۹؛ کاپون، ۱۹۶۹) و خودهمبستگی مکانی (SPAC) (اکی، ۱۹۵۷؛ بتینگ و همکاران، ۲۰۰۱). روش SPAC مبتنی بر نظریه اکی (۱۹۵۷) روشی شناخته شده است و عموماً نیازمند یک آرایه دایره‌ای شامل M ایستگاه محیطی و یک ایستگاه مرکزی است. در واقع روش SPAC به منظور برآورد

اندازه‌گیری‌های آرایه‌ای ارتعاشات محیطی یا نوفه زمینه به منزله روشی آسان و مقرون‌به‌صرفه برای تشخیص لایه‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (آپوستولیدیس و همکاران، ۲۰۰۴؛ اوکادا، ۲۰۰۳). این روش‌ها امکان تعیین خواص فیزیکی نهشته‌های رسوبی را با بررسی انتشار ارتعاشات طبیعی به دست می‌دهند و نیاز به استفاده از چشمه‌های مصنوعی امواج مانند انفجارات یا دستگاه‌های ارتعاش‌ساز را برطرف می‌کنند؛ به علاوه، استفاده از این روش برای بررسی ساختار کم‌عمق می‌تواند روش مناسبی برای به حداقل رساندن استفاده از روش‌های

در این مقاله، ابتدا به طور خلاصه مبانی مدل MSPAC و مدل پیشنهادی در تعیین ضرایب همبستگی مرور می‌شود؛ سپس، ضرایب همبستگی با استفاده از نگاشت‌های مؤلفه قائم میکروترموهای ثبت شده در یک آرایه دایره‌ای به دو روش فوق محاسبه شده است. همچنین، با وارون‌سازی ضرایب همبستگی، نیمرخ‌های سرعت موج برشی حاصل از هر مدل استخراج شده و با نیمرخ سرعت موج برشی به دست آمده از روش‌های مستقیم حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) مقایسه شده است.

۲ ضرایب خودهمبستگی مکانی در مدل MSPAC

اکی (۱۹۵۷) روشن ساخت که برای سیگنال‌های ثبت شده با آرایه‌ای دایره‌ای به شعاع r ، ضریب SPAC برای همه ایستگاه‌های موجود روی پیرامون دایره نسبت به مرکز آرایه معادل با تابع بسل درجه صفر از نوع اول است؛

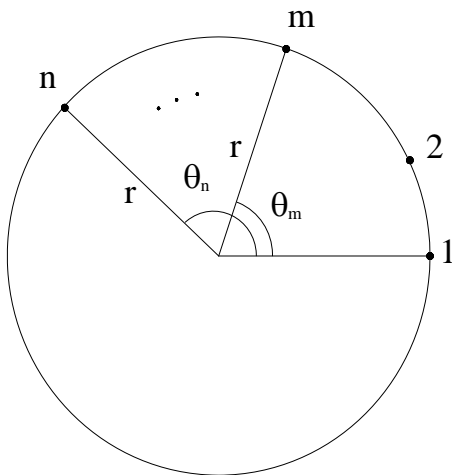
$$\rho(\omega) = J_0(kr) = J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega)}r\right), \quad (1)$$

که در آن $c(\omega)$ سرعت فاز امواج رایلی برای بسامد زاویه‌ای ω و k عدد موج است. چنین کمیتی برای هر بسامد f پس از اعمال فیلتری با پهنای باند باریک روی سیگنال‌ها به دست می‌آید. روش اکی (۱۹۵۷) مبتنی بر آرایه دایره‌ای پیوسته است (یعنی آرایه‌ای فرضی که در هر زاویه ممکن نسبت به مرکز آرایه، یک ایستگاه روی آرایه وجود داشته باشد).

روش محاسبه ضریب SPAC به گونه‌ای دیگر از سوی بتیگ و همکاران (۲۰۰۱) عرضه شده است. آنها روش تعدیل‌یافته SPAC (MSPAC) را برای آرایه‌های غیردایره‌ای پیشنهاد کرده‌اند. بتیگ و همکاران (۲۰۰۱) همه جفت ایستگاه‌های ممکن را با در نظر گرفتن آزیموت راستای بین هر جفت ایستگاه در یک آرایه کمکی نشان دادند و آرایه کمکی را به حلقه‌های هم‌مرکز دسته‌بندی کردند و ضریب SPAC تعدیل یافته را

کردن منحنی‌های پاشندگی (Dispersion Curves) امواج سطحی طراحی شده است تا همبستگی بین میکروترموهای ثبت شده در ایستگاه‌های آرایه مورد تحلیل قرار گیرد. با استفاده از منحنی‌های پاشندگی می‌توان ساختار محیط انتشار را تشخیص داد. از آنجاکه این روش مبتنی بر روش‌های آماری در زمان و مکان است، فرض می‌شود که سیگنال مشاهده شده یک نوفه تصادفی است که در هر دو حوزه زمان و مکان پایا است (بتیگ و همکاران، ۲۰۰۱).

تحقیقات گذشته با آرایه دایره‌ای، همگی مبتنی بر نظریه پایه عرضه شده اکی (۱۹۵۷) هستند. مدل ریاضی پیشنهادی اکی (۱۹۵۷) یک ایستگاه را در مرکز و تعداد بی‌نهایت ایستگاه را روی محیط آرایه فرض می‌کند. این مدل تابع بسل نوع اول درجه صفر را برای میانگین آزیموتی ضریب خودهمبستگی مکانی (SPAC) محاسبه شده برای همه ایستگاه‌های روی محیط دایره با ایستگاه مرکزی به دست می‌دهد. از طرف دیگر، اوکادا (۲۰۰۶) مدل اکی (۱۹۵۷) را به ازای تعداد محدود ایستگاه‌های روی آرایه بهینه کرد و به تابع بسل نوع اول از درجه صفر مراتب زوج تابع بسل برای ضریب SPAC را افزود. در این دو مدل فقط خودهمبستگی بین ایستگاه‌های محیطی با ایستگاه مرکزی محاسبه می‌شود. از طرف دیگر، بتیگ و همکاران (۲۰۰۱) تعدیلی در روش پیشنهاد کردند تا بتوان آرایه‌های نامنظم را نیز مورد تحلیل قرار داد. آنان در عین حال همبستگی بین همه جفت ایستگاه‌های ممکن را نیز در محاسبات خودهمبستگی در نظر گرفتند، به طوری که برای جفت ایستگاه‌های دارای فواصل بین‌ایستگاهی همسان میانگین‌گیری آزیموتی را جداگانه عملی می‌کند. در روش پیشنهادی در این تحقیق همبستگی محاسبه شده بین همه جفت ایستگاه‌های ممکن در یک آرایه کمکی (به قسمت ۳ مراجعه شود) با فواصل بین ایستگاهی متفاوت با هم میانگین‌گیری می‌شوند.



شکل ۱. آرایه دایره‌ای با شعاع r دارای M ایستگاه محیطی؛ زاویه راستای ایستگاه m با مرکز و راستای افق است و θ_n زاویه راستای ایستگاه n با مرکز و راستای افق است.

اوکادا (۲۰۰۳) با جای‌گذاری رابطه (۴) در رابطه (۳)، رابطه زیر را به‌دست آورد:

$$S_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} g_{mn}(kr, \phi) h(\omega, \phi) d\omega d\phi, \quad (۶)$$

به‌طوری‌که $g_{mn}(kr, \phi)$ همبستگی بین ایستگاه‌های m و n در ω و ϕ معلوم را نشان می‌دهد.

$$g_{mn}(kr, \phi) = \exp ikr \{ \cos(\theta_m - \phi) - \cos(\theta_n - \phi) \} \quad (۷)$$

مدل زیر ضرایب SPAC بین همه جفت ایستگاه‌های ممکن روی پیرامون آرایه را محاسبه می‌کند و تابع SPAC را با میانگین‌گیری روی توابع SPAC برای همه جفت ایستگاه‌های غیر تکراری به‌دست می‌دهد:

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{\substack{m, n=1 \\ m < n}}^M S_{mn} \quad (۸)$$

در این رابطه $N = \frac{M(M-1)}{2}$ تعداد همه جفت ایستگاه‌های ممکن غیر تکراری است. در این مدل، ابتدا همه فواصل بین‌ایستگاهی ممکن بین همه جفت ایستگاه‌های آرایه دسته‌بندی می‌شود. برای همه جفت

به‌صورت زیر به‌دست آوردند:

$$\bar{\rho}_{r_{k1}, r_{k2}}(\omega) = \frac{2}{r_{k2}^2 - r_{k1}^2} \frac{c(\omega)}{\omega} \left[r_{k2} J_1\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r_{k2}\right) - r_{k1} J_1\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r_{k1}\right) \right] \quad (۲)$$

که در آن r_{k1} و r_{k2} پهنای حلقه k ام را نشان می‌دهند.

۳ ضرایب خودهمبستگی مکانی در روش بازنگری شده

تابع SPAC برای دو سیگنال مشاهده شده در ایستگاه‌های متفاوت m و n ($m \neq n$) روی محیط آرایه (شکل ۱) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{mn} = E[X(t, r, \theta_m) X^*(t, r, \theta_n)], \quad (۳)$$

$$m, n \in [1, M], \quad m \neq n$$

اینجا X سیگنال ثبت شده قطبیده در راستای قائم در ایستگاه m ام، $m = 1, 2, 3, \dots, M$ و دارای مختصات قطبی (r, θ_m) است. فرض بر این است که چشمه به اندازه کافی از ایستگاه‌ها دور باشد تا بتوان سیگنال حاصل را تخت در نظر گرفت. سیگنال ثبت شده را به‌صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$X(t, r, \theta_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} \exp \{ i\omega t + ikr(\theta_m - \phi) \} d\zeta(\omega, \phi) \quad (۴)$$

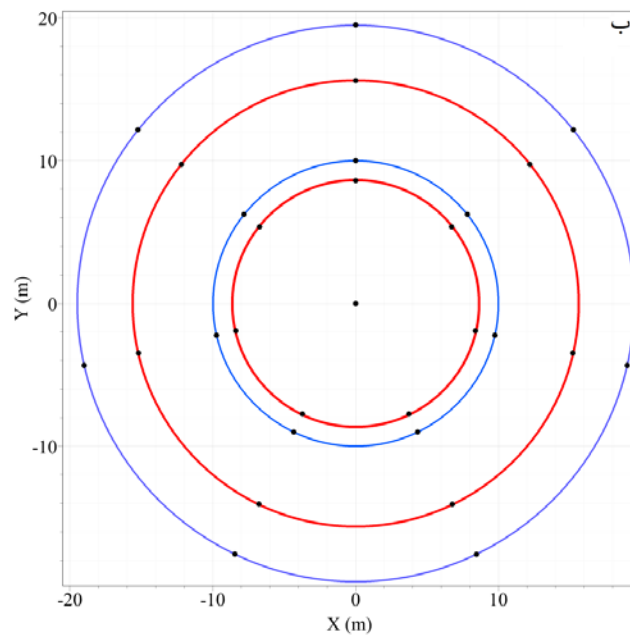
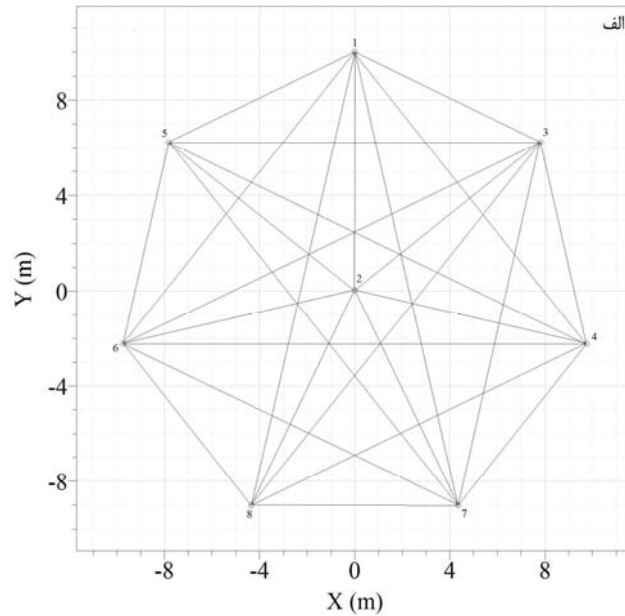
به‌طوری‌که $d\zeta(\omega, \phi)$ دامنه متغیر تصادفی مختلط است که اوکادا (۲۰۰۳) آن را به‌صورت زیر تعریف کرده است:

$$d\zeta(\omega, \phi) = \zeta(\omega + d\omega, \phi + d\phi) - \zeta(\omega, \phi) \quad (۵)$$

می‌شود که ۷ ایستگاه روی هر دایره قرار دارد (شکل ۲ب).

به آسانی می‌توان نشان داد که آرایه دایره‌های دارای توزیع یکنواخت ایستگاه‌ها روی محیط آن با زاویه بین‌ایستگاهی $2\pi/M$ است، و آرایه کمکی نیز دارای همان زاویه بین‌ایستگاهی است.

ایستگاه‌های دارای فواصل یکسان، دایره‌هایی با شعاع‌های مساوی فاصله‌های بین‌ایستگاهی در نظر گرفته می‌شود و مجموعه این دایره‌ها را آرایه کمکی می‌نامیم. برای نمونه، برای آرایه‌ای دارای ۷ ایستگاه روی محیط آن، کلیه فواصل ممکن دسته‌بندی می‌شوند (شکل ۲الف) و آرایه کمکی شامل ۴ دایره



شکل ۲. الف) آرایه دایره‌های ۷ ایستگاه محیطی و نمایش همه فواصل بین‌ایستگاهی ممکن، ب) آرایه کمکی شامل ۴ دایره هم‌مرکز به شعاع فواصل بین‌ایستگاهی در آرایه اصلی که هریک شامل ۷ ایستگاه می‌شوند.

(۱) اگر $r_{k1} \rightarrow r_{k2}$ میل کند در این صورت رابطه (۲) به مدل اکی، یعنی $J_0\left(\frac{\omega r_{k2}}{c(\omega)}\right)$ میل می‌کند. به عبارت دیگر برای $\Delta r_k (= r_{k2} - r_{k1})$ کوچک به ازای همه k ها، ضریب SPAC به مدل اکی تبدیل می‌شود.

(۲) اگر $r_{k1} \rightarrow 0$ و $r_{k2} \rightarrow 2r$ در این صورت رابطه (۲) به $J_1(2kr)/kr$ تبدیل می‌شود، که در آن $k = \omega/c$ عدد موج است. مشاهده می‌شود که در این حالت فقط یک حلقه با شعاع‌های از صفر تا $2r$ خواهیم داشت. می‌توان نشان داد که مدل پیشنهادی با این حالت خاص از MSPAC در یک تابع چگالی وزنی تفاوت دارد. از آنجاکه در MSPAC روی همه حلقه انتگرال بسته می‌شود، همه آزیموت‌ها و فواصلی که جفت ایستگاهی از آرایه وجود ندارد نیز در انتگرال‌گیری منظور می‌شوند. بنابراین، مدل پیشنهادی حالت خاصی از MSPAC نیست.

شکل ۳ ضریب SPAC را به ازای $M=3, 4, 5, 20$ با تابع بسل مرتبه صفر نوع اول مقایسه می‌کند. مقایسه بین ρ_3, ρ_4, ρ_5 و ρ_{20} حاصل از رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن کلیه جفت ایستگاه‌های ممکن شیب منحنی ضرایب SPAC افزایش می‌یابد، در نتیجه در مقایسه با مدل اکی (۱۹۵۷) (تابع بسل مرتبه صفر از نوع اول) توان تفکیک به سمت عدد موج‌های کمتر یا طول موج‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد. با این نتیجه می‌توان منحنی‌های پاشندگی را برای طول موج‌های بلندتر نیز به دست آورد که در نتیجه نیم‌رخ‌های سرعت عمیق‌تری در مقایسه با روش SPAC متعارف در آرایه نظیر به دست می‌آید.

تعداد ایستگاه‌ها روی هر دایره از آرایه کمکی برای M فرد معادل M است و برای M زوج نیز به جز برای آخرین دایره خارجی که $M/2$ است، معادل M است. تعداد کل دایره‌های آرایه کمکی برای M فرد معادل $Q = \frac{M-1}{2}$ است و برای M زوج معادل $Q = \frac{M}{2}$ است. برای ترکیب دو حالت M زوج و M فرد می‌توان Q را به صورت $\lfloor M/2 \rfloor$ معرفی کرد، $\lfloor M/2 \rfloor$ بزرگ‌ترین عدد صحیح کوچک‌تر یا مساوی $M/2$ است. به سادگی می‌توان نشان داد که شعاع دایره معادل با $r_j = 2r \sin\left(\frac{j\pi}{M}\right)$, $j = 1, 2, \dots, Q$ است. بنابراین، یک رابطه کلی برای تابع SPAC برای تعداد ایستگاه‌های فرد یا زوج به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\bar{S}_M(kr) = \sum_{j=1}^{\lfloor M/2 \rfloor} J_0\left(2r \sin\left(\frac{j\pi}{M}\right)\right) h_0(\omega) \quad (9)$$

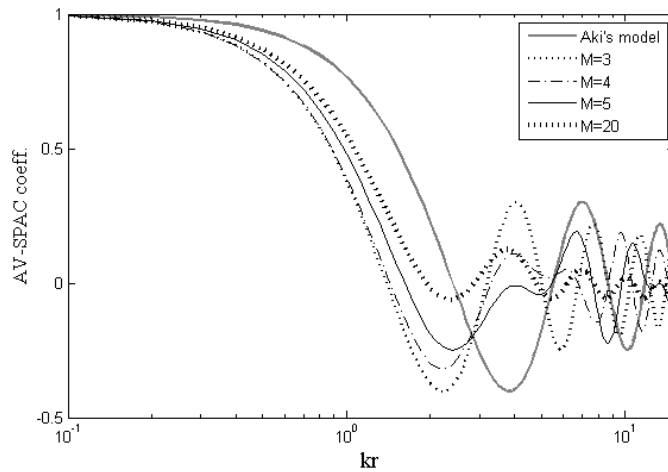
که در آن $h_0(\omega)$ با انتگرال‌گیری از تابع PSD روی φ به دست می‌آید. برای هر دایره با شعاع r_j ، تابع SPAC به صورت زیر محاسبه می‌شود (اوکادا، ۲۰۰۳):

$$\bar{S}(\omega, kr_j) = J_0(kr_j) h_0(\omega), j = 1, 2, \dots, Q \quad (10)$$

با نرمال کردن رابطه (۹) به طوری که بیشینه آن یک باشد، ضریب SPAC به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho_M(kr) = \frac{1}{\lfloor M/2 \rfloor} \sum_{j=1}^{\lfloor M/2 \rfloor} J_0\left(2kr \sin\left(\frac{j\pi}{M}\right)\right) \quad (11)$$

برای مقایسه ضریب خودهمبستگی حاصل از روش بازنگری شده و MSPAC دو حالت زیر را می‌توان در نظر گرفت:

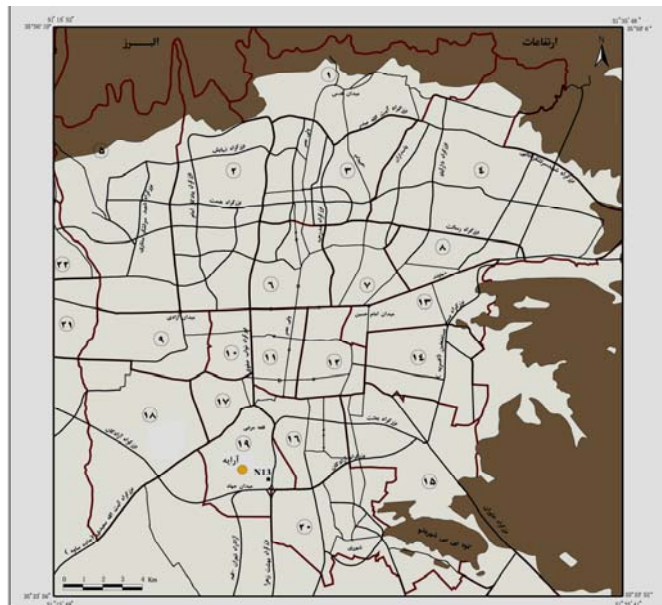


شکل ۳. مقایسه ضریب SPAC برای $M=3, 4, 5, 20$ با تابع بسط مرتبه صفر از نوع اول.

گره‌های مورد استفاده در این اندازه‌گیری از نوع گورالپ CMG6TD و زمان اندازه‌گیری در آبان ماه ۱۳۸۶ بوده است (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹). یک گمانه ۱۲۰ متری در نزدیکی محل برداشت آرایه، حفاری شده در طرح ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران (جایکا و سست، ۲۰۰۰) قرار دارد. این گمانه در گزارش طرح مورد اشاره با شماره N13 نام‌گذاری شده و در اینجا نیز به همان نام روی نقشه شکل ۴ نمایش داده شده است.

۴ اندازه‌گیری‌های آرایه‌ای - داده واقعی

در این تحقیق از داده‌های برداشت شده در یک آرایه به قطر ۲۰ متر در جنوب غرب تهران استفاده شده است. از آنجا که توپوگرافی محلی و دیگر محدودیت‌ها از جمله موانع (شهری)، شکل و ابعاد آرایه را تحت الشعاع قرار می‌دهد، منطقه مورد بررسی به گونه‌ای انتخاب شده که فاقد اثرات توپوگرافی باشد. شکل ۴ محل اندازه‌گیری آرایه (مشخص شده با دایره توپُر) را نشان می‌دهد. حس



شکل ۴. نمایش مکان اندازه‌گیری آرایه‌ای ارتعاشات محیطی در جنوب تهران، مشخص شده با دایره توپُر و محل گمانه N13 در طرح ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر تهران، روی نقشه شهر تهران.

زمین برای مناطق متفاوت شهر تهران برای تحلیل لرزه‌ای است که در جدول ۱ نشان داده شده است. محل برداشت آرایه مورد بررسی در بخشی از شهر تهران قرار گرفته است که با مدل زمین شماره ۴ مطابقت دارد (جدول ۱).

البته در این تحقیق به علت ابعاد کوچک آرایه، از اطلاعات گمانه استفاده نشده است بلکه از مدل زمین شماره ۴ حاصل از تحقیقات (جایکا و سست، ۲۰۰۰) که در جدول ۱ نشان داده شده است، استفاده کرده‌ایم. حاصل تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰)، ۴۱ مدل

جدول ۱. تعداد ۴۱ مدل زمین عرضه شده برای گستره شهر تهران توسط جایکا و سست (۲۰۰۰).

شماره مدل	عمق (GL-m)																										
	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰	۵۵	۶۰	۶۵	۷۰	۷۵	۸۰	۸۵	۹۰	۹۵	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۵۰		
۱	C1	C1	C1	C1	C1	C1	CS3	CS3	CS3	CS3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C4
۲	C1	C1	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C4
۳	C1	C1	CS1	CS1	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C4
۴	C1	C1	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C4
۵	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C2	C2	C2	C2	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C4
۶	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4
۷	C1	C1	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C3	C3	C3	C3	C4												C4
۸	C1	C1	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	C4													C4
۹	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C4												C4
۱۰	C1	C1	CS2	CS2	CS2	CS2	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C4												C4
۱۱	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	C2	C2	C2	C2	C4												C4
۱۲	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4																C4
۱۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۱۴	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																CS4
۱۵	CS1	CS1	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۱۶	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۱۷	C2	C2	CS1	CS1	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۱۸	G2	G2	CS1	CS1	CS1	CS1	G3	G3	G3	G3	G4																G4
۱۹	C3	C3	C3	C3	C3	C3	G3	G3	G3	G3	G4																G4
۲۰	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۲۱	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																CS4
۲۲	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C4																				C4
۲۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4																				C4
۲۴	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																				CS4
۲۵	C1	C1	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																				CS4
۲۶	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																				CS4
۲۷	G2	G2	G4	G4	G3	G3	G4																				G4
۲۸	C2	C2	G3	G3	G3	G4																					G4
۲۹	S3	S3	S3	S3	S3	G4																					G4
۳۰	S3	S3	G3	G3	G3	G4																					G4
۳۱	G3	G3	G3	G3	G3	G4																					G4
۳۲	G2	G2	G3	G3	G4																						G4
۳۳	G3	G3	G3	G3	G4																						G4
۳۴	G3	G3	G3	G4																							G4
۳۵	S3	S3	S3	G4																							G4
۳۶	CS3	CS3	CS3	G4																							G4
۳۷	C1	C1	C1	G4																							G4
۳۸	C2	C2	C2	G4																							G4
۳۹	G3	G3	G4																								G4
۴۰	Pre-Miocene																										
۴۱	Rock																										

نام خاک، علامت راهنما و مقدار N

رِس	C1	C2	C3	C4
مقدار میانگین N	15	35	75	100
ماسه و رس	CS1	CS2	CS3	CS4
مقدار میانگین N	15	35	75	100
ماسه	S1	S2	S3	S4
مقدار میانگین N	15	35	75	100
شن	G1	G2	G3	G4
مقدار میانگین N	15	35	75	100

G4

سنگ بستر لرزهای مهندسی و نوع خاک آن

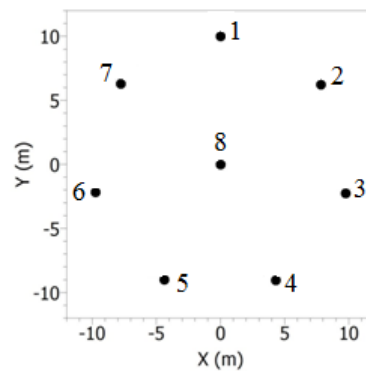
نیمرخ سرعت موج برشی حاصل از محاسبات تجربی برای مدل خاک شماره ۴ در جدول ۱ معرفی شده است و در شکل های ۱۰ و ۱۲ به صورت خط چین مشکی رنگ نشان داده شده است.

شکل ۵ آرایه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد که دارای ۷ ایستگاه واقع بر پیرامون دایره ای با شعاع ۱۰ متر و یک ایستگاه مرکزی است. در این تحقیق از ارتعاشات ثبت شده با این آرایه، به مدت زمان حدود یک ساعت و با نرخ نمونه برداری ۱۰۰ Hz استفاده شده است (شکل ۶).

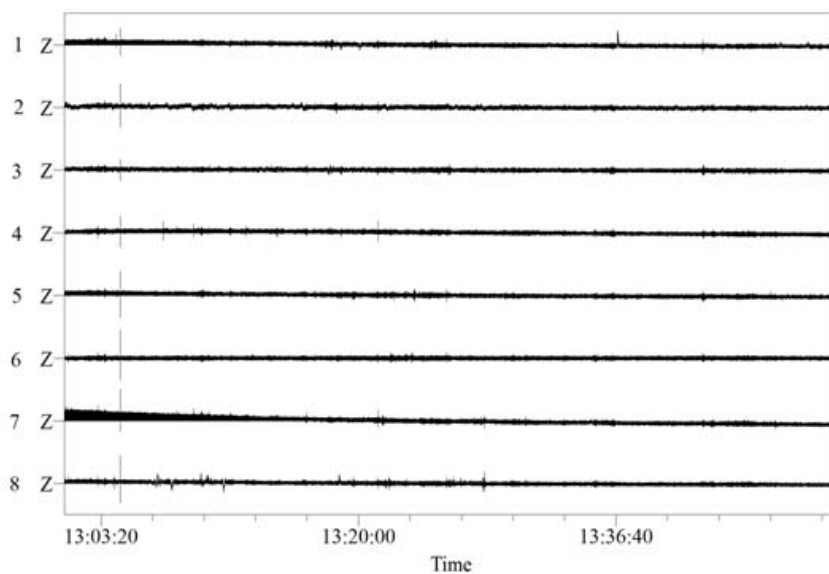
این مدل سه لایه متمایز واقع بر سنگ بستر لرزه ای مهندسی است به طوری که، تا عمق ۱۰ متر رُس نرم، تا عمق ۵۰ متر رُس نیمه سخت و تا عمق ۱۵۰ متر رُس سخت روی سنگ بستر شنی پیش بینی می کند. با استفاده از رابطه تجربی عرضه شده در تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) سرعت موج برشی در هر لایه قابل محاسبه است. به طوری که، رابطه بین مقدار N در آزمایش نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی V_s عبارت است از

$$V_s = 161 N_{eq}^{0.277}, (N_{eq} < 200) \quad (12)$$

مقدار N در محاسبات، معادل با ۳۰ سانتی متر نفوذ یا N_{eq} در نظر گرفته می شود.



شکل ۵. آرایه مورد استفاده در این تحقیق، ۷ ایستگاه واقع بر دایره ای با شعاع ۱۰ متر و یک ایستگاه در مرکز قرار دارد.

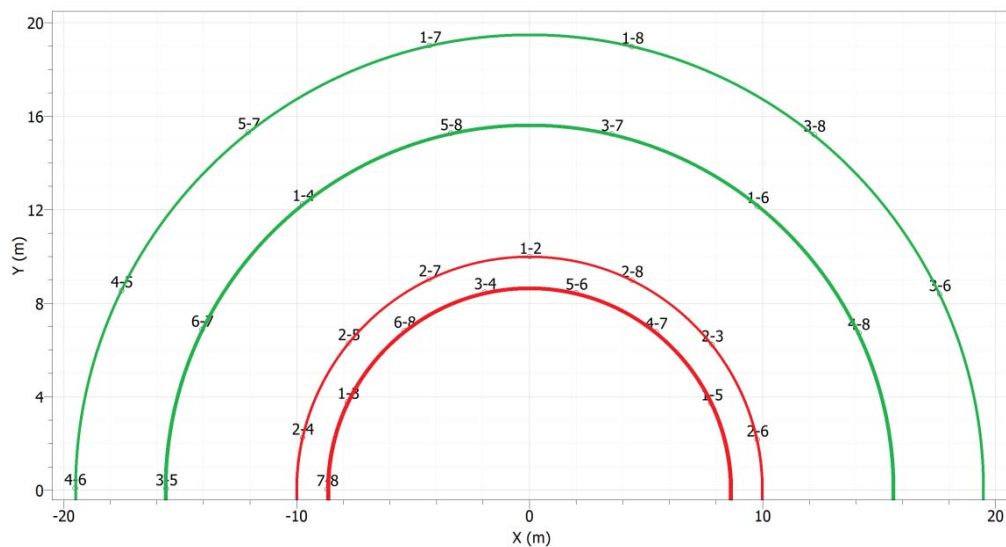


شکل ۶. نمایش سیگنال های ثبت شده در آرایه به مدت حدود یک ساعت.

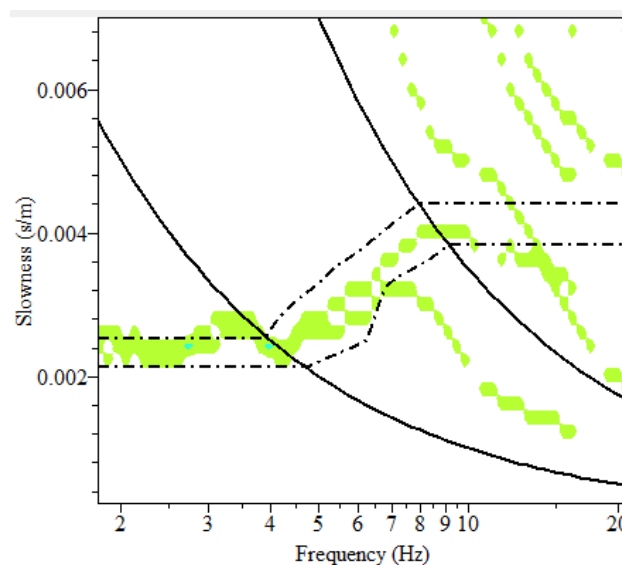
۱-۴ نتایج حاصل از مدل MSPAC

نگاشت‌های مؤلفه قائم میکروترموهای ثبت شده در آرایه با روش خودهمبستگی مکانی (بتیگ و همکاران، ۲۰۰۱) با نرم‌افزار Geopsy (قابل دسترس از <http://www.geopsy.org>) تحلیل شده است. آزمایشات و فواصل بین همه جفت ایستگاه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. نیم‌دایره‌های رنگی نشان‌دهنده حلقه‌های

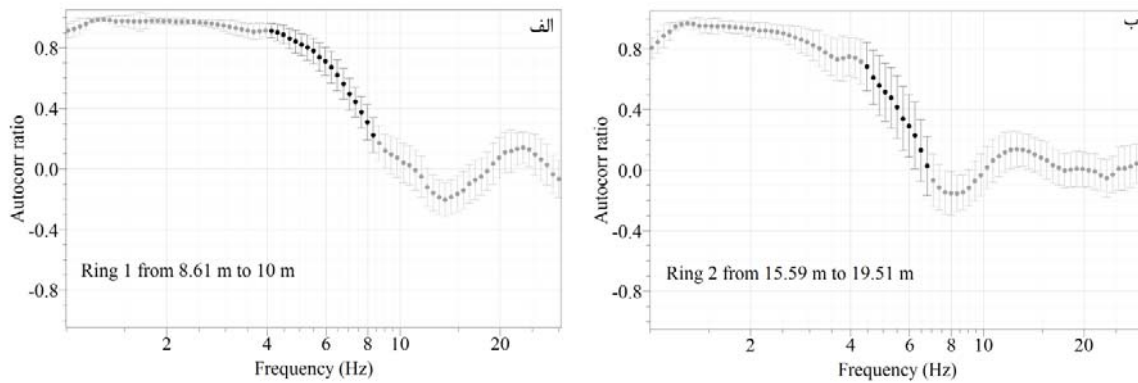
انتخاب شده برای محاسبه ضرایب SPAC هستند. منحنی پاشندگی (کندی برحسب بسامد) حاصل از تحلیل MSPAC در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل خطوط پیوسته محدوده قابل قبول عدد موج را نشان می‌دهند و خطوط نقطه‌چین محدوده متراکم جواب‌های منحنی پاشندگی را نشان می‌دهد. برای روش تعیین این محدوده‌ها می‌توان به واتلت (۲۰۰۵) مراجعه کرد.



شکل ۷. نمایش آزمایشات برحسب فاصله بین ایستگاهی در آرایه. هرکدام از نقاط نماینده یک جفت ایستگاه است که نام آنها بالای هر نقطه درج شده است. دوحلقه با شعاع‌های میانگین ۹/۳ متر و ۱۷/۵۵ متر شامل جفت ایستگاه‌های با فواصل تقریباً یکسان انتخاب شده‌اند.



شکل ۸. تحلیل ضرایب SPAC حاصل از آرایه به روش MSPAC. نقاط سبزرنگ نشان‌دهنده تراکم جواب‌های منحنی پاشندگی در فضای کندی-بسامد هستند. خطوط پیوسته، محدوده قابل قبول عدد موج و خطوط نقطه‌چین محدوده متراکم جواب‌های منحنی پاشندگی را نشان می‌دهد.



شکل ۹. ضرایب SPAC حاصل از پردازش سیگنال‌های ثبت شده در آرایه به روش MSPAC به‌همراه انحراف معیار در هر نقطه، الف) ضرایب SPAC حاصل از حلقه‌ای با شعاع داخلی ۸/۶۱ متر و شعاع خارجی ۱۰ متر، ب) ضرایب SPAC حاصل از حلقه‌ای با شعاع داخلی ۱۵/۵۹ متر و شعاع خارجی ۱۹/۵۱ متر.

شکل ۱۰ نتایج حاصل از وارون‌سازی نمونه‌های منتخب از منحنی‌های ضرایب SPAC حاصل از مشاهدات را برای دو حلقه نشان داده شده در شکل ۹، با در نظر گرفتن مدل اولیه سه لایه روی نیم‌فضا نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پنج بار اجرای برنامه با دادن مدل اولیه فوق و در هر بار اجرا تعداد ۲۵۵۰ مدل زمین تولید شده است. سپس با مقایسه با منحنی پاشش تجربی برای اجرای بعدی و کاهش خطا ادامه یافته است. این عملیات برای هر دو منحنی خودهمبستگی حاصل از حلقه اول با شعاع میانگین ۹/۳ متر (شکل ۱۰ب) و حلقه دوم با شعاع میانگین ۱۷/۵۵ متر (شکل ۱۰ج) به انجام رسیده است.

ضرایب SPAC برای پنجره‌های زمانی به طول ۳۰ ثانیه محاسبه شده‌اند. شکل ۹ دو منحنی محاسبه شده ضرایب SPAC برای دو حلقه انتخاب شده را نشان می‌دهد، خطوط خاکستری کوتاه نشان‌دهنده انحراف معیار هستند. نقاط مشکی رنگ نمونه‌های مناسب برای بررسی وارون‌سازی ضرایب SPAC هستند. معیار انتخاب این نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است؛ برای جزئیات بیشتر می‌توان به واتلت (۲۰۰۵) مراجعه کرد.

محاسبات وارون‌سازی ضرایب SPAC با استفاده از نرم‌افزار Dinver (قابل دسترس از

$$Misfit = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_F} (x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_F}} \quad (13)$$

شکل ۱۰ نتایج حاصل از وارون‌سازی نمونه‌های منتخب از منحنی‌های ضرایب SPAC حاصل از مشاهدات را برای دو حلقه نشان داده شده در شکل ۹، با در نظر گرفتن مدل اولیه سه لایه روی نیم‌فضا نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پنج بار اجرای برنامه با دادن مدل اولیه فوق و در هر بار اجرا تعداد ۲۵۵۰ مدل زمین تولید شده است. سپس با مقایسه با منحنی پاشش تجربی برای اجرای بعدی و کاهش خطا ادامه یافته است. این عملیات برای هر دو منحنی خودهمبستگی حاصل از حلقه اول با شعاع میانگین ۹/۳ متر (شکل ۱۰ب) و حلقه دوم با شعاع میانگین ۱۷/۵۵ متر (شکل ۱۰ج) به انجام رسیده است.

ضرایب SPAC برای پنجره‌های زمانی به طول ۳۰ ثانیه محاسبه شده‌اند. شکل ۹ دو منحنی محاسبه شده ضرایب SPAC برای دو حلقه انتخاب شده را نشان می‌دهد، خطوط خاکستری کوتاه نشان‌دهنده انحراف معیار هستند. نقاط مشکی رنگ نمونه‌های مناسب برای بررسی وارون‌سازی ضرایب SPAC هستند. معیار انتخاب این نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است؛ برای جزئیات بیشتر می‌توان به واتلت (۲۰۰۵) مراجعه کرد.

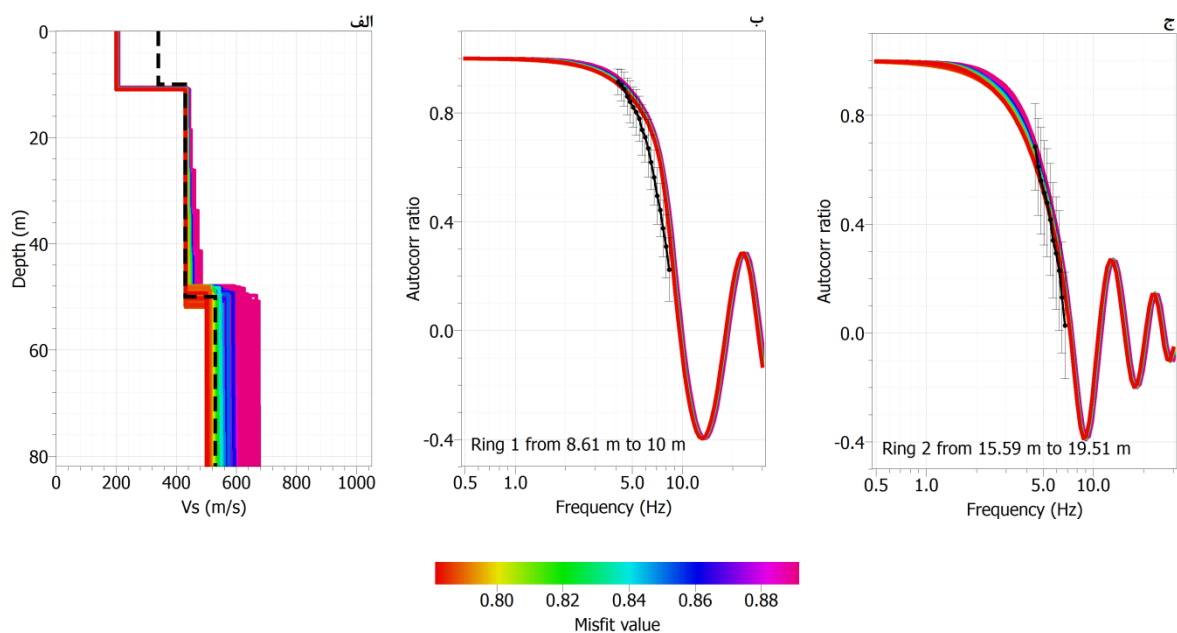
محاسبات وارون‌سازی ضرایب SPAC با استفاده از نرم‌افزار Dinver (قابل دسترس از

۲-۴ نتایج حاصل از روش بازنگری شده

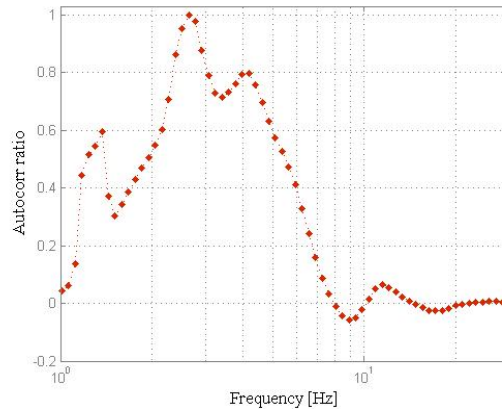
به منظور آزمایش روش بازنگری شده با استفاده از نگاشت‌های مؤلفه قائم میکروترموهای ثبت شده در آرایه منحنی ضرایب SPAC را با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه کرده‌ایم. در این روش برخلاف روش MSPAC که بین همبستگی‌های محاسبه شده برای فواصل بین ایستگاهی یکسان ضرایب خودهمبستگی را محاسبه می‌کند، همبستگی بین همه جفت ایستگاه‌های ممکن محاسبه و پس از میانگین‌گیری روی نتایج ضریب SPAC محاسبه می‌شود. این محاسبات در نرم‌افزار مطلب (MATLAB) صورت گرفته است. در شکل ۱۱ منحنی ضرایب حاصل را برحسب بسامد نشان داده‌ایم. در این محاسبات عدم قطعیت در هر نقطه مانند روش SPAC لحاظ نشده است.

به طوری که، مقدار سرعت منحنی حاصل از مشاهدات و x_{ci} مقدار سرعت منحنی حاصل از محاسبات در بسامد f_i است، σ_i عدم قطعیت در نمونه‌های بسامد است و n_F تعداد نمونه‌های بسامد است.

نیمرخ‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون‌سازی در اعماق کمتر از ۱۰ متر مقدار سرعت موج برشی را کمتر از مقدار مورد انتظار از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) به دست می‌دهد، هرچند که تغییر سرعت موج برشی در ۱۰ متر را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، در مقایسه با اطلاعات گمانه‌ای، تغییرات سرعت را تا عمق ۵۰ متر به خوبی به دست می‌دهد. برای اعماق بیش از ۵۰ متر، مقادیر سرعت موج برشی بسیار متفاوتی را می‌توان نظیر ضرایب SPAC حاصل از مشاهدات در نظر گرفت که دلیل آن می‌تواند فقدان اطلاعات در بسامدهای کم باشد (واتلت و همکاران، ۲۰۰۴).



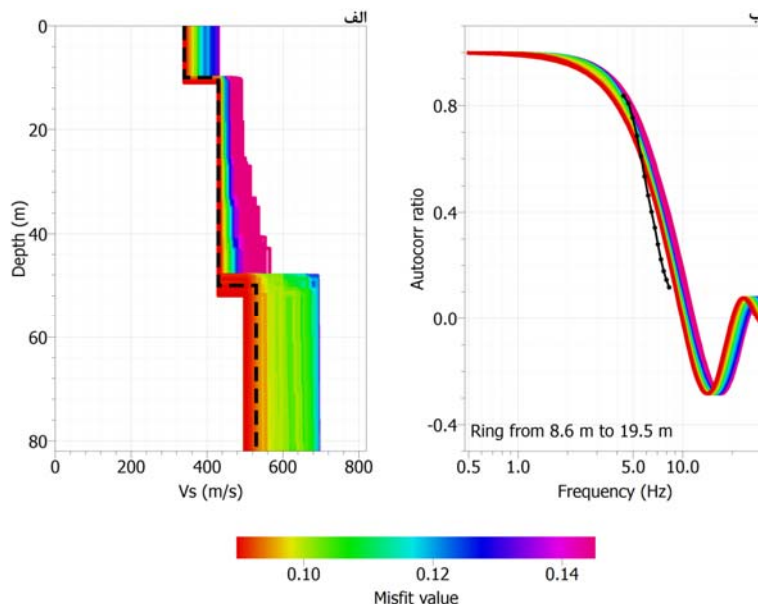
شکل ۱۰. نتایج وارون‌سازی ضرایب SPAC به روش MSPAC؛ (الف) همه مدل‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون‌سازی ضرایب SPAC دارای حداقل نبود انطباق (کمتر از ۰/۹)، نقطه‌چین مشگیرنگ، نیمرخ سرعتی ناشی از مدل زمین حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) است، (ب) ضرایب SPAC حاصل از وارون‌سازی (منحنی‌های رنگی) در مقایسه با نتایج حاصل از مشاهدات (نمونه‌های مشگی‌رنگ به همراه انحراف معیار مربوط) برای حلقه اول با شعاع ۸/۶۱ متر و شعاع خارجی ۱۰ متر (ج) ضرایب SPAC حاصل از وارون‌سازی در مقایسه با نتایج حاصل از مشاهدات (نمونه‌های مشگی‌رنگ به همراه انحراف معیار مربوطه) حلقه دوم با شعاع داخلی ۱۵/۵۹ متر و شعاع خارجی ۱۹/۵۱ متر.



شکل ۱۱. منحنی ضریب خودهمبستگی مکانی در روش بازنگری شده حاصل از تحلیل مؤلفه قائم میکروترموهای ثبت شده در آرایه.

نیمرخ سرعت موج برشی را برای همه مدل‌های منطبق شده با منحنی ضرایب SPAC که نبود انطباقی کمتر از ۰/۱۵ دارند را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ب نیز منحنی‌های ضرایب SPAC حاصل از تحقیقات وارون را در مقایسه با منحنی‌های ضرایب SPAC به دست آمده از پردازش میکروترموهای مشاهده شده برای حلقه‌ای با شعاع داخلی ۸/۶ متر و شعاع خارجی ۱۹/۵ متر مقایسه می‌کند.

وارون‌سازی منحنی ضرایب SPAC با استفاده از نرم‌افزار Geopsy، همچنان‌که در روش MSPAC شرح داده شد، قابل اجرا است. شکل ۱۲ نتایج حاصل از تحقیقات وارون با اعمال همان پارامترهای استفاده شده در روش MSPAC را نشان می‌دهد. شکل ۱۲الف مدل‌های سرعت موج برشی حاصل از تحلیل وارون را در مقایسه با نیمرخ سرعت موج برشی حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) (خط چین مشکی‌رنگ) نشان می‌دهد،



شکل ۱۲. نتایج وارون‌سازی منحنی ضرایب SPAC: (الف) مدل‌های سرعت موج برشی، خطوط مشکی‌رنگ نیمرخ سرعتی مدل زمین حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) است، (ب) منحنی‌های ضرایب SPAC در مقایسه با منحنی‌های حاصل از مشاهدات برای یک حلقه با شعاع داخلی ۸/۶ متر و شعاع خارجی ۱۹/۵ متر.

۵ بحث و نتیجه گیری

در این مقاله مدل جدیدی به منظور برآورد ضریب SPAC عرضه شد. روش بازنگری شده بر در نظر گرفتن همه همبستگی‌های موجود بین همه جفت ایستگاه‌های ممکن مبتنی است. به این منظور یک آرایه کمکی معرفی می‌شود، به طوری که آرایه دایره‌ای را با حفظ زوایای آزمون‌های ایستگاه‌ها شامل همه جفت ایستگاه‌های ممکن به آرایه کمکی تصویر می‌کند. ضرایب SPAC حاصل از هر دو مدل در شکل‌های ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده است.

تحقیقات وارون روی ضرایب خودهمبستگی حاصل از پردازش میکروترموورها در هر دو روش با استفاده از پارامترهای یکسان در عملیات وارون‌سازی صورت گرفته است، به طوری که مدل اولیه زمین به صورت سه لایه افقی روی نیم‌فضا فرض شده است. در روش MSPAC نیم‌رخ‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون‌سازی در عمق‌های بیش از ۱۰ متر و کمتر از ۵۰ متر با مدل زمین حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) به خوبی همخوانی دارند و در اعماق کمتر از ۱۰ متر نیم‌رخ‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون‌سازی مقدار سرعت موج برشی را کمتر از مقدار حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) نشان می‌دهد (شکل ۱۰ الف). از طرف دیگر، نیم‌رخ‌های سرعت موج برشی حاصل از وارون‌سازی نتایج حاصل از کاربرد روش بازنگری شده در مقایسه با مدل سرعت حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) در عمق‌های کمتر از ۵۰ متر به خوبی همخوانی دارند (شکل ۱۲ الف)، این روش در برآورد کردن نیم‌رخ سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر نیز دقت مناسبی دارد.

۶ تشکر و قدردانی

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند، مراتب تشکر را از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر فراهم آوردن

امکان به انجام رسیدن این تحقیق اعلام کنند. همچنین، از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های آرایه‌ای طرح پژوهشی شماره ۶۵۰۶ با عنوان "بررسی ویژگی‌های آبرفت‌های عمیق تهران" صمیمانه قدردانی می‌کنیم.

منابع

- شعبانی، ا.، میرزایی، ن.، حق‌شناس، ا. و اسکندری، م.، ۱۳۸۹، برآورد سرعت موج برشی با ترکیب روش‌های آرایه‌ای و وارون‌سازی منحنی‌های بیضی‌واری در ساختگاهی در جنوب شهر تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، (۴) ۳۶، ۱-۱۳.
- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **35**, 415-456.
- Apostolidis, P., Raptakis, D., Roumelioti, Z. and Ptilakis, K., 2004, Determination of S-wave velocity structure using microtremors and SPAC method applied in Thessaloniki (Greece), *Soil Dyn. Earthqu. Eng.* **24**, 49-67.
- Bettig, B., Bard, P. Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C. and Hatzfeld, D., 2001, Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial autocorrelation method (SPAC): application to the Grenoble area, *Boll. Geofis. Teor. Appl.* **42**, 281-304.
- Capon, J., 1969, High-resolution frequency-wave number spectrum analysis, *Proc. IEEE* **57**, 1408-1418.
- García-Jerez, A., Luzón, F., Navarro, M. and Pérez-Ruiz, J. A., 2008, Determination of elastic properties of shallow sedimentary deposits applying a spatial autocorrelation method, *Geomorphology*, **93**, 74-88.
- JICA (Japan International Cooperation Agency) and CEST (Centre for Earthquake & Environmental Studies of Tehran, Tehran Municipality), 2000, The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran, final report.
- Lacoss, R. T., Kelly, E. J. and Toksoz, M. N., 1969, Estimation of seismic noise structure using arrays, *Geophysics*, **34**, 21-38.
- Okada, H., 2006, Theory of efficient array observations of microtremors with special

- reference to the SPAC method, *Exploration Geophysics*, **37**, 73-85.
- Okada, H., 2003, *The Microtremor Survey Method* (translated by Koya Suto): Geophysical Monograph Series, No. 12, Society of Exploration Geophysicists.
- Wathelet, M., Jongmans, D. and Ohrnberger, M., 2004, Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, **2**, 211–221.
- Wathelet, M., 2005, *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. PhD thesis, Université de Liège, Belgium.