

بررسی ماهیت بیشینه نسبت طیفی H/V ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران

مهرداد فتوحی مهر^۱، الهام شعبانی^{۲*}، نوربخش میرزائی^۳ و ابراهیم حق‌شناس^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

^۳ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۴ استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۴/۲۴، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از ریزلرزه (میکروترمور) ها در تحقیقات اثر ساختگاه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نبود شناخت درست از ماهیت میدان موج ریزلرزه‌ها ممکن است منجر به تفسیرهای نادرستی از اثر ساختگاه شود. به این علت بررسی میدان این موج‌ها دارای اهمیت است. در تحقیق حاضر، با استفاده از روش تک‌ایستگاهی به بررسی ماهیت ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران پرداخته شده است. ابتدا، رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها در دو ایستگاه ثبت ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، نمودارهای طیف دامنه و منحنی‌های H/V با منحنی‌های بیضی‌واری (Ellipticity) حاصل از مدل‌سازی موج ری‌لی مقایسه شده‌اند. بررسی ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران نشان می‌دهد که مد اصلی موج ری‌لی منطبق بر بسامد تشدید ساختگاه است.

واژه‌های کلیدی: ریزلرزه، روش نسبت طیف مؤلفه افقی به قائم (H/V)، منحنی بیضی‌واری، موج ری‌لی، تهران

Investigating the nature of microtremor H/V spectral ratio peak in south of Tehran

Fotouhimehr, M.¹, Shabani, E.², Mirzaei, N.³ and Haghshenas, E.⁴

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

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

³Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

⁴Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 15 Jul 2013, Accepted: 17 Feb 2015)

Summary

By growing the population and need for settlement, many cities have been built on soft sediments and seismic areas. It emphasizes the need for a careful and reliable assessment of site effect phenomena. Beyond the methods of studying site effects, microtremor recordings has become popular over the last decades as it offers a convenient, practical and low cost tool to be used in urbanized areas. Besides, in areas of low to moderate seismicity which gathering a significant number of recordings with satisfactory signal to noise ratio is a time-consuming task, microtremor studies are more useful.

Lack of accurate knowledge about the nature of microtremor wave field, would lead to misinterpretation of site effects, hence, investigating microtremor wave field is an important goal to achieve. Two techniques are predominantly used to determine microtremor wave field: the array techniques (such as SPAC and F-K methods) and the single station horizontal to vertical spectral ratio (H/V). Array studies have shown that surface waves dominate microtremor wave field, but the relative proportion of Rayleigh and love waves has still been unclear.

In this study, single station horizontal to vertical spectral ratio method was applied to investigate the nature of microtremors in south of Tehran. Theoretical aspects of this method, has always been a considerable issue for researchers in this field. Regarding the

dominance of fundamental Rayleigh wave mode on vertical component of microtremors, some researchers believe that, if impedance contrast between surface layers and the bedrock tend to be high, ellipticity curves (ellipticity at each frequency is defined as the ratio between the horizontal and vertical displacement eigenfunctions in the P-SV case, at the free surface) of fundamental Rayleigh wave mode shows a conspicuous peak around the site resonance frequency. It is due to the vanishing of vertical component corresponding to reversal rotation of fundamental Rayleigh wave from retrograde to prograde, In contrast, some other researchers do believe that the SH resonance in surficial layers (removing the effects of surface waves) accounts for H/V ratio peaks.

Data used in this study was recorded by Haghshenas et al. (2003) using continuous recording for a period of five months in 13 seismological stations. The results of two stations are shown here. Geopsy software (www.geopsy.org) is used to analyze microtremors.

First, particle motion behavior in microtremor wave filed was studied. The results showed an elliptical behavior that can be related to predominance of Rayleigh waves in microtremor wave field. It should be mentioned that if body waves dominate the wave filed, the particle motion will show a linear behavior which is not observed in our study. Then, spectrum amplitude curves were obtained. To compute H/V for each time window, root mean square of two horizontal amplitude spectra is divided by vertical amplitude spectra at each point. H/V curves showed that site resonance frequency varies from 0.3 to 5 Hz in south of Tehran. Our study revealed that the peaks at site resonance frequency were localized by minima in vertical amplitude spectra as well as by maxima in horizontal amplitude spectra. To study dispersion property of layers beneath each station, shear wave velocity variation with respect to depth was investigated. Dispersion curves were obtained based on earth models. It was shown that the under-structure layers are dispersive. Take into consideration that Tehran has a complicated geological state and lack of borehole information, Jica & Cest report (2000) was used to obtain earth models. Jica & Cest report (2000) includes only thickness and type of layers, while, the shear and longitudinal wave velocity is needed. Jica & Cest report (2000) contains Standard Penetration Test values according to the type and thickness of layers and experimental relations between these values and shear wave velocity. These relations were used to compute shear wave velocity under each station. Longitudinal velocities were computed by the relation proposed by Lay and Wallace (1995).

Finally, ellipticity curves of Rayleigh waves were modeled and compared with H/V curves. The same earth models of previous step were used to model ellipticity curves. The ellipticity curves showed a conspicuous peak around the site resonance frequency. These could be due to the reversal motion of fundamental Rayleigh wave mode from retrograde to prograde. To sum up, it could be said that in south of Tehran, fundamental mode of Rayleigh wave accounts for H/V ratio peak.

Keywords: Microtremor, Horizontal to vertical spectral ratio method (H/V), Ellipticity curve, Rayleigh wave, Tehran

۱ مقدمه

جمعیت و نیاز به گسترش شهرها، خیلی از شهرها روی رسوبات نرم (دره‌ها، دلتاها، نهشته‌های جوان) برپا شده‌اند که ساختار خاک آنها مستعد تقویت موج‌های لرزه‌ای است (مورفی و شاه، ۱۹۸۸؛ لاجت و بارد، ۱۹۹۴؛ کورنو و همکاران، ۲۰۰۳). اثر تقویت ساختگاه با وابستگی بسامدی،

بیان کمی اثر ساختگاه یا به عبارتی جنبش زمین مرتبط با شرایط زمین‌شناسی سطحی، از اهداف اصلی تحقیقات زلزله‌شناسی مهندسی و برآورد خطر زمین‌لرزه است (به عنوان نمونه، بوچرت، ۱۹۷۰؛ شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹). این مسئله از آن جهت حائز اهمیت است که با افزایش

ریزلرزه‌ها موج‌های غالب هستند، در صورتی که تباین امیدانسن بین لایه‌های سطحی و سنگ بستر زیاد باشد، منحنی‌های بیضی‌واری موج‌های ریلی (نسبت بین تابع‌های ویژه جابه‌جایی افقی و قائم ذرات موج ریلی در سطح زمین) بیشینه واضحی در حوالی بسامد تشدید ساختگاه آشکار می‌سازند که این بیشینه مربوط به محو شدن مؤلفه قائم در نتیجه وارون شدن حرکت ذرات موج ریلی از پسگرد به پیشگرد است. در مقابل، عده‌ای دیگر از محققان از جمله ناکامورا (۱۹۸۹، ۲۰۰۰)، ماهیت بیشینه منحنی H/V را به موج‌های حجمی نسبت می‌دهند و معتقدند که این بیشینه مربوط به تشدید موج SH در لایه‌های سست سطحی است. بودین و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقی که در خلیج می‌سی‌سی‌پی به انجام رساندند، با مقایسه بیشینه‌های مشاهده شده روی نمودار طیفی مؤلفه افقی به قائم ریزلرزه‌ها و منحنی طیف دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم، دوره تناوب اصلی تشدید ساختگاه را بررسی کردند. آنها روشن ساختند که، در دوره تناوب تشدید ساختگاه، دامنه طیف مؤلفه‌های افقی به مقدار بیشینه و دامنه طیف مؤلفه قائم به مقدار کمینه رسیده‌اند. آستن (۲۰۰۴)، متعاقب تحقیق بودین و همکاران (۲۰۰۱)، با استفاده از مدل‌سازی جنبش ذره موج ریلی، نشان داد که بیشینه‌های مشاهده شده در روش H/V را می‌توان با فرض غالب بودن موج‌های ریلی تفسیر کرد.

در این تحقیق، ابتدا، رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، با استفاده از اندازه‌گیری‌های تک‌ایستگاهی ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران، بیشینه‌های منحنی‌های H/V در هر ایستگاه تعیین شده است. سپس، با بررسی پاشنده بودن ساختار لایه‌های زیرسطحی هر ایستگاه، با مدل کردن جنبش بیضی‌واری موج‌های ریلی، بیشینه نسبت H/V مربوط به بسامد اصلی تشدید و اولین بیشینه مد اصلی موج‌های ریلی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در جنوب شهر تهران مد اصلی موج‌های ریلی توجیه‌کننده بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه است.

به بازتاب‌ها و اثرات تشدید حاصل از موج‌های برشی منتشر شده در رسوبات تحکیم نیافته‌ای که روی سازندهای سخت‌تر قرار گرفته‌اند نسبت داده می‌شود (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹).

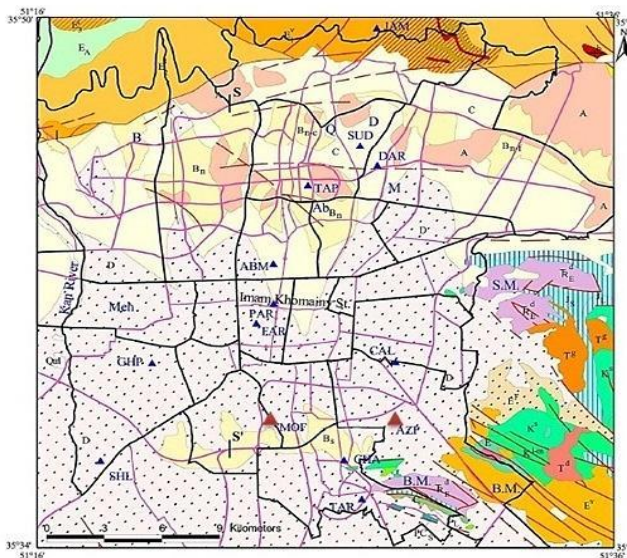
در سال‌های اخیر، در بررسی اثر ساختگاه روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری ریزلرزه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶). این روش‌ها به علت سادگی، کم‌هزینه بودن و غیر مخرب بودن در مناطق شهری، در مقایسه با روش‌های شبیه‌سازی عددی همراه با روش‌های قدیمی ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی (روش لرزه‌ای شکستی، روش لرزه‌ای بازتابی، حفر گمانه و مانند آن) اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین، در مناطقی که دارای آهنگ لرزه‌خیزی پایینی هستند و مدت زیادی طول می‌کشد تا داده‌های مناسب با نسبت سیگنال به نوفه زیاد جمع‌آوری شوند، استفاده از ریزلرزه‌ها بسیار سودمند خواهد بود (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶). در نتیجه، شناخت ماهیت میدان موج ریزلرزه‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. فقدان شناخت درست از ماهیت میدان موج ریزلرزه‌ها باعث می‌شود که تفسیرهای مربوط به اثر ساختگاه دارای دقت کافی نباشند (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶). تحقیقات نشان داده است که قسمت اعظم موج‌های تشکیل‌دهنده میدان موج ریزلرزه‌ها از موج‌های سطحی تشکیل شده است، اما، در این زمینه توافق کلی بین محققان در مورد نسبت مشارکت موج‌های ریلی و موج‌های لایه در میدان موج ریزلرزه‌ها وجود ندارد (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶).

روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) (نوگوشی و ایگاراشی، ۱۹۷۱؛ ناکامورا، ۱۹۸۹) برای تعیین بسامد تشدید ساختگاه به کار می‌رود. در مورد ماهیت بیشینه بسامد تشدید ساختگاه روی منحنی‌های H/V نظرهای متفاوتی وجود دارد؛ به نظر برخی از محققان (مثلاً، لاچت و بارد، ۱۹۹۴؛ کونو و اوماچی، ۱۹۹۸؛ بارد، ۱۹۹۸) با توجه به اینکه معمولاً مد اصلی موج‌های ریلی روی مؤلفه قائم

گرفته است. شکل ۱ موقعیت دو ایستگاه انتخاب شده برای پژوهش حاضر به نام‌های AZP (پارک آبی آزادگان) و MOF (بیمارستان مفرح در منطقه خانی آباد) را در جنوب شهر تهران با مثلث‌های سرخ رنگ روی نقشه زمین‌شناسی تهران نشان می‌دهد. برای پردازش داده‌های ریزلرزه‌ها از نرم‌افزار geopsy (www.geopsy.org) استفاده شده است.

۲ ثبت ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران

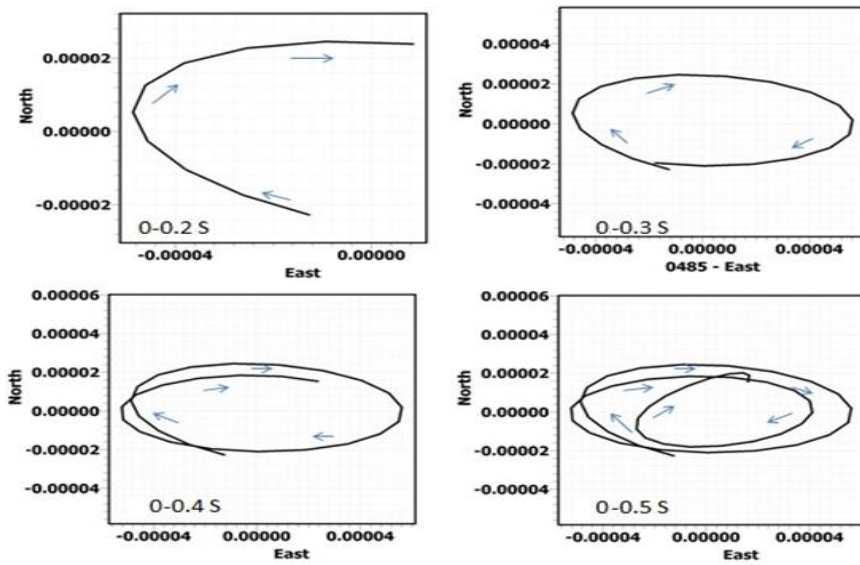
در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده با یک شبکه لرزه‌نگاری موقت ۱۴ ایستگاهی، نصب شده در سال ۲۰۰۲ در تهران (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۰۳؛ حق‌شناس، ۲۰۰۵) استفاده شده است. اندازه‌گیری‌ها در طول پنج ماه به طور مستمر با لرزه‌سنج‌های سه مؤلفه‌ای CMG-40T صورت



Legend

QUATERNARY	Qul	River Channel	
	D	D - Formation	
	C	C - Formation	
	B	B - Formation [Conglomerate (Including KAHRIZAK Formation; Plio-pleistocene)	
	A	A - Formation [Conglomerate (Including HEZARDARREH Formation ; Mio - pliocene)	
NEOGENE	M	M : Undifferentiated Sandstone and Mudstone (Upper Red Formation)	T ^b Basic / Intermediate silt
			T ^g Granite
			T ^d Diorite
Eocene	E ₃	E ₃ : Upper Tuff member : Andesite/ dacite lava and pyroclastics , shale , marl / sandstone	
	E ₂	E ₂ : Middle Tuff member ; Dacic , pyroclastics and minor lava , shale , conglomerate	
	E ₁	E ₁ : Lower shale member ; shale , dacite lava and pyroclastics	
	E ₂	E ₂ : Limestone ; nummulitic (ZIYARAT Formation)	
	E ₃	E ₃ : Gypsum	
	E ₄	E ₄ : Conglomerate and conglomeratic limestone (FAJAN Formation)	
CRETACEOUS	K ¹	K ¹ : Limestone and marl	Cenomanian - Campanian
	K ²	K ² : Shale , Sandstone and conglomerate	
	K ³	K ³ : Orbitolina limestone (TIZKUH Formation ; Aptain - Albian)	
JURASSIC	J ₁	J ₁ : Limestone (LAR Limestone)	
	J ₂	J ₂ : Shale and Sandstone ; coal bearing (SHEMASHAK Formation)	
TRASSIC	T ₂	T ₂ : Dolomite and limestone	
CARBO-NIFER	C	C : Limestone (MOBARAK LIMESTONE)	
UPPERCAM-CAMBRIAN	C ₁	C ₁ : Sandstone , quartzite on top (LALUN SANDSTONE)	
	PC ₁	PC ₁ : Dolomite , shale (SOLTANIEH DOLOMITE with chapoghlu shale member)	
			Major Fault
			Minor Fault
			High Way
			Roads

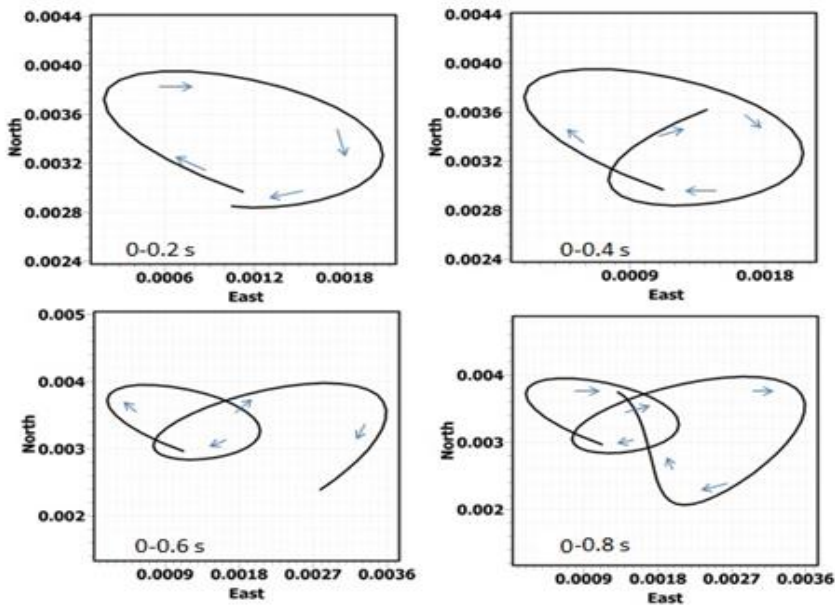
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری ریزلرزه‌ها در شهر تهران (علامت‌های مثلث‌شکل) روی نقشه زمین‌شناسی تهران (جعفری و همکاران، ۱۳۷۹، بر گرفته از نقشه زمین‌شناسی تهران، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۵ و عباسی و شعبانیان، ۱۹۹۹). داده‌های دو ایستگاه نشان داده شده با مثلث‌های به رنگ سرخ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها در ایستگاه AZP، پیکان‌ها جهت حرکت را نشان می‌دهند.

بیضی وار دارد که با گذشت زمان، این رفتار بیضی وار تکرار می‌شود. این رفتار بیضی وار را می‌توان به غالب بودن موج‌های ریلی در میدان موج ریزلرزه‌ها نسبت داد. در صورتی که موج‌های حجمی غالب بر میدان موج ریزلرزه‌ها باشند، عمده رفتار جنبش ذره در صفحه افقی، حالت خطی دارد (لی و والاس، ۱۹۹۵)، در حالی که، در شکل‌های فوق رفتار جنبش ذره خطی نیست.

۳ بررسی رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها برای بررسی رفتار جنبش ذره، نگاهت ریزلرزه‌ها به پنجره‌های زمانی بسیار کوتاه (در حد چند دهم ثانیه) تقسیم شده و نحوه تغییرات رفتار جنبش ذره در این پنجره‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار جنبش ذره در صفحه انتشار امواج، برای ایستگاه‌های AZP و MOF، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. جنبش ذره رفتاری



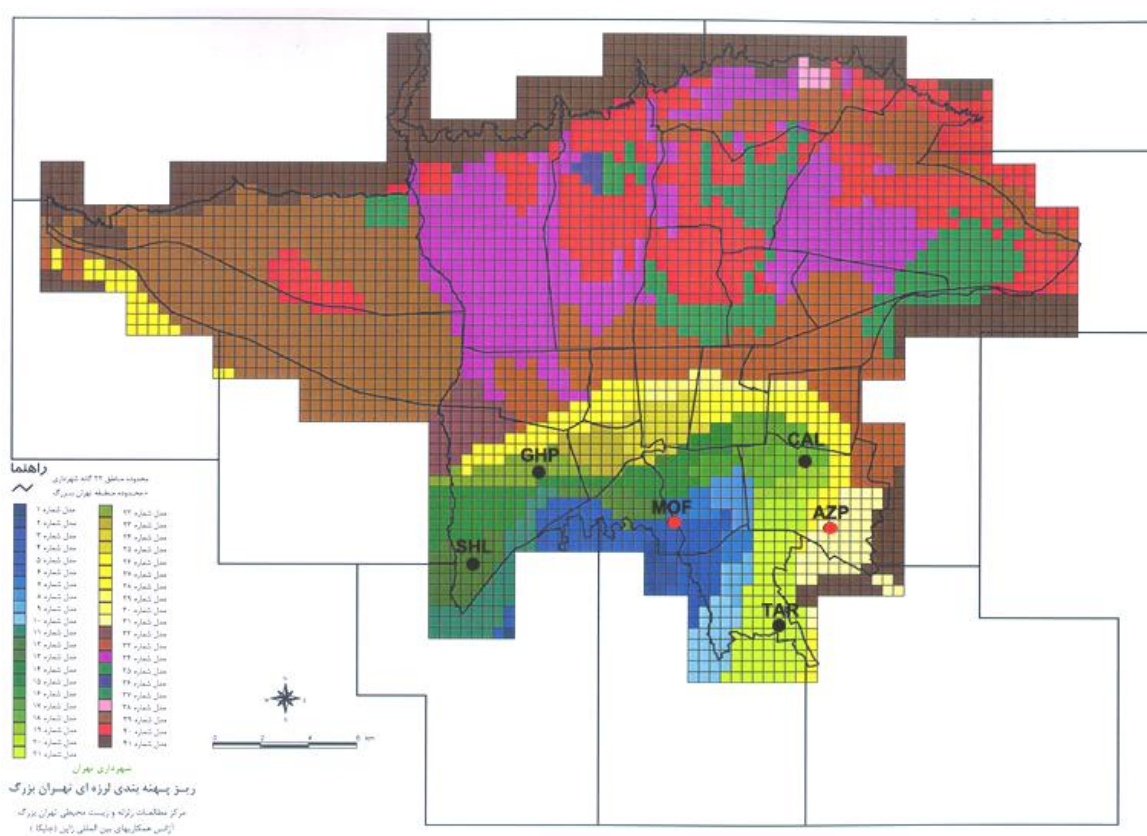
شکل ۳. رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها در ایستگاه MOF، پیکان‌ها جهت حرکت را نشان می‌دهند.

مقدار اصلاح شده عدد ضربات نفوذ استاندارد) به چهار گروه (جدول ۱-الف) تقسیم و نیم‌رخ خاک در سطح شهر تهران در قالب ۴۱ نیم‌رخ نماینده، طبقه‌بندی شده‌اند (جدول ۱-ب).

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مطابق با نقشه مدل‌های زمین (شکل ۴)، ایستگاه AZP در جنوب شرق تهران به‌طور غالب از نهشته‌های درشت‌دانه شنی تشکیل شده است و عمق سنگ بستر لرزه‌ای نیز کم (۴۰ متر) است. اما، در محل ایستگاه MOF نیم‌رخ خاک بیشتر از نوع رسی و رسی ماسه‌ای با سختی متوسط است و عمق سنگ بستر لرزه‌ای نیز زیاد (۱۵۰ متر) برآورد شده است. این شرایط خاک با وضعیت زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی این دو ایستگاه (افزایش عمق آبرفت و کاهش اندازه دانه‌ها از شرق به غرب با افزایش فاصله از ارتفاعات) به‌خوبی هم‌خوانی دارد.

۴ مدل‌سازی منحنی بیضی‌واری موج‌ریلی

در حالت حضور هم‌زمان موج‌های P و SV، بیضی‌واری موج‌ریلی، جنبش ذره در سطح زمین را به‌صورت نسبت بین تابع‌های ویژه جابه‌جایی افقی و قائم در هر بسامد نشان می‌دهد (فا و همکاران ۲۰۰۱؛ شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹). برای مدل‌سازی موج‌ریلی نیاز به شناخت نیم‌رخ خاک منطقه است که در این مورد با توجه به نبود گمانه در محل ایستگاه‌های مورد بررسی، از نقشه مدل‌های زمین (شکل ۴) عرضه شده جایکا و سست (۲۰۰۰)، برای استخراج مدل‌های زمین استفاده شده است. مدل‌های داده شده در این گزارش براساس جمع‌آوری اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در طرح‌های عمرانی و حفاری‌های صورت گرفته برای طرح ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران به‌دست آمده است. مطابق با تحقیق پیش‌گفته، خاک‌ها براساس مقدار N



شکل ۴. موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران روی نقشه مدل‌های زمین برای تحلیل لرزه‌ای تهران (علامت‌های دایره‌ای شکل) (جایکا و سست، ۲۰۰۰)، محل ایستگاه‌های مورد بررسی با دایره‌های توپر سرخ‌رنگ مشخص شده است.

دامنه ارتعاشات، از روش هموارسازی کونو-اوماچی (۱۹۹۸) استفاده شده است. تابع لگاریتمی داده شده این محققان به شرح رابطه (۴) است:

$$W_B(f, f_c) = [Sin(log(f/f_c)^b) / (log(f/f_c)^b)]^4 \quad (4)$$

که در آن، b ضریب پهنای باند، f بسامد مورد نظر و f_c بسامد مرکزی است. از آنجا که این تابع، یک تابع لگاریتمی است، با افزایش دوره تناوب شکل تابع ثابت می ماند و همچنین، این تابع نسبت به بسامد مرکزی متقارن است. از دیگر مزایای این تابع آن است که بیشینه‌های مربوط به بسامدهای کم را حفظ می کند. بین میزان هموار شدن با این تابع و ضریب b رابطه عکس وجود دارد، به طوری که، با افزایش مقدار b ، نمودار با این تابع کمتر هموار می شود. در این تحقیق، برای مقدار b عدد ۴۰ در نظر گرفته شد.

به این ترتیب ابتدا، منحنی‌های طیف دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم ریزلرزه‌ها و سپس، منحنی‌های نسبت طیف مؤلفه افقی به قائم (H/V) در هر ایستگاه بررسی شده است. بررسی تغییرات طیف دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم ریزلرزه‌ها در ایستگاه‌های AZP و MOF نشان دهنده تغییر روند ناگهانی به ترتیب، در بسامدهای ۴/۸ و ۰/۴ هرتر است (شکل‌های ۵-الف و ۶-الف). با توجه به غالب بودن موج ری‌لی در میدان موج ریزلرزه‌ها، این تغییر نشان دهنده تغییر حالت حرکت ذرات از پسگرد به پیشگرد در نتیجه کاهش ناگهانی طیف دامنه مؤلفه قائم و خصوصیات بیضی‌واری موج‌های ری‌لی است. نسبت‌های طیفی H/V (شکل‌های ۵-ب و ۶-ب)، وجود یک بیشینه مشخص را در بسامد ۴/۸ هرتر در ایستگاه AZP و ۰/۴ هرتر در ایستگاه MOF نشان می دهد که بسامد تشدید این دو ساختگاه هستند. لازم به ذکر است که علت تغییر بسامد تشدید در ساختگاه‌های مورد بررسی، وجود شرایط متفاوت ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی در محل ساختگاه‌های مورد تحقیق است.

در مرحله بعد، با استفاده از تغییرات سرعت موج برشی نسبت به عمق حاصل از اطلاعات مدل‌های زمین، پاشنده

مدل‌های زمین عرضه شده در گزارش جایکا و سست (۲۰۰۰) شامل اطلاعات ضخامت و جنس لایه‌ها است (جدول ۱-ب). برای مدل‌سازی منحنی‌های بیضی‌واری موج‌های ری‌لی سرعت موج برشی (V_S) و سرعت موج طولی (V_P) در هر لایه نیز مورد نیاز است، به همین منظور، با توجه به جدول ۱-الف، دسته‌بندی جنس لایه‌های زیر ایستگاه‌های مورد بررسی براساس عدد آزمایش نفوذ استاندارد (N) میانگین، سرعت موج برشی (V_S) مربوط به ساختار زیر سطح هر ایستگاه با استفاده از رابطه تجربی (۱) پیشنهاد شده تحقیق جایکا و سست (۲۰۰۰) تعیین شده است:

$$V_S = 161 N^{0.277} \quad N < 200 \quad (1)$$

همچنین، سرعت موج طولی (V_P) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است (لی و والاس، ۱۹۹۵):

$$V_P = \sqrt{3} V_S \quad (2)$$

مقادیر محاسبه شده V_S و V_P در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

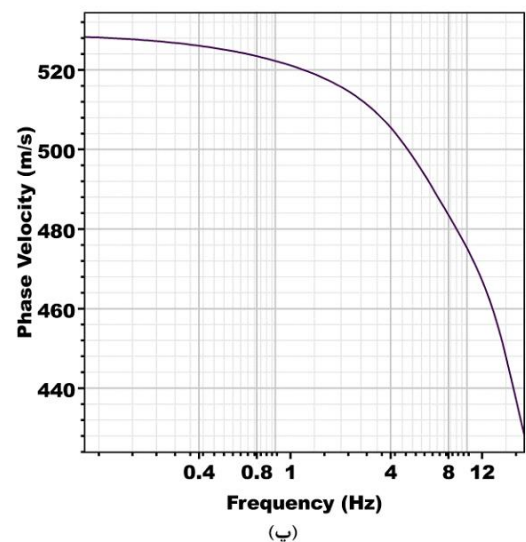
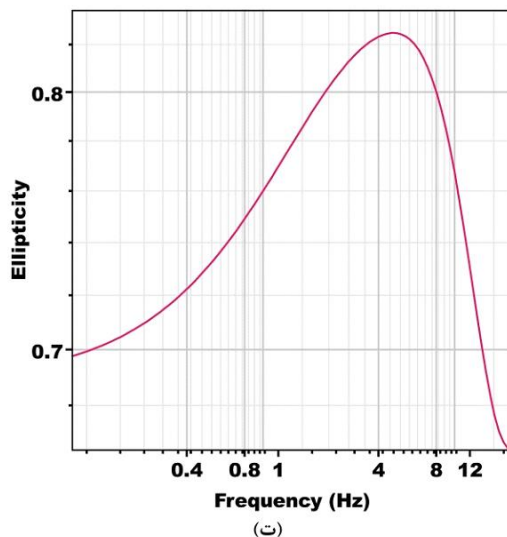
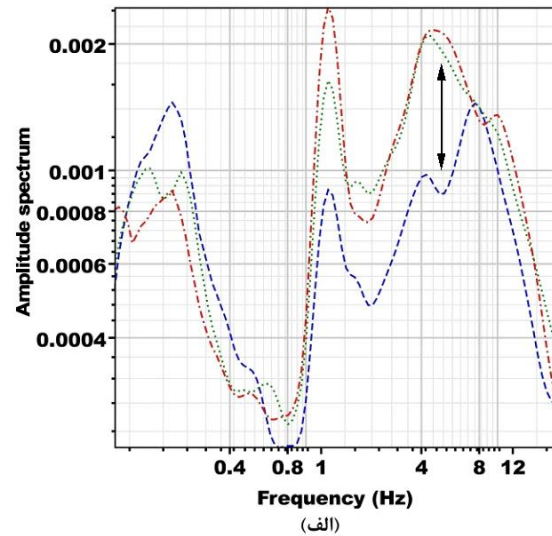
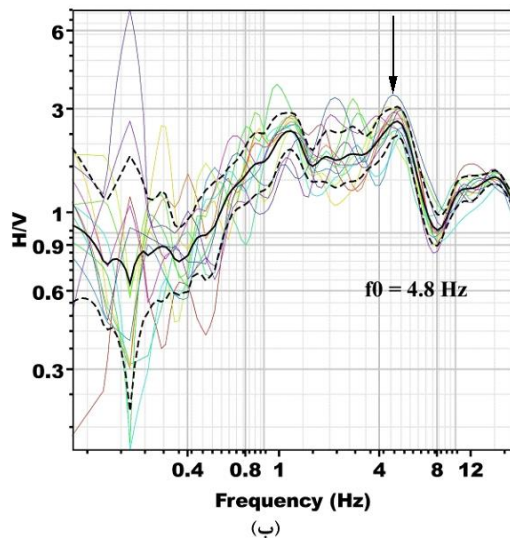
۵ تحلیل داده‌های اندازه‌گیری تک‌ایستگاهی ریزلرزه‌ها با محاسبه طیف فوریه دامنه ریزلرزه‌ها برای هر سه مؤلفه شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم در هر ایستگاه و میانگین‌گیری از طیف دامنه مربوط به دو مؤلفه افقی و محاسبه نسبت این میانگین به طیف دامنه مؤلفه قائم، طیف H/V مربوط به هر پنجره زمانی اعمال شده روی نگاشت، تعیین شده است. برای میانگین‌گیری از طیف فوریه دامنه دو مؤلفه افقی از روش جذر میانگین مربعات به صورت زیر استفاده شده است:

$$H = \sqrt{\frac{N(f)^2 + E(f)^2}{2}} \quad (3)$$

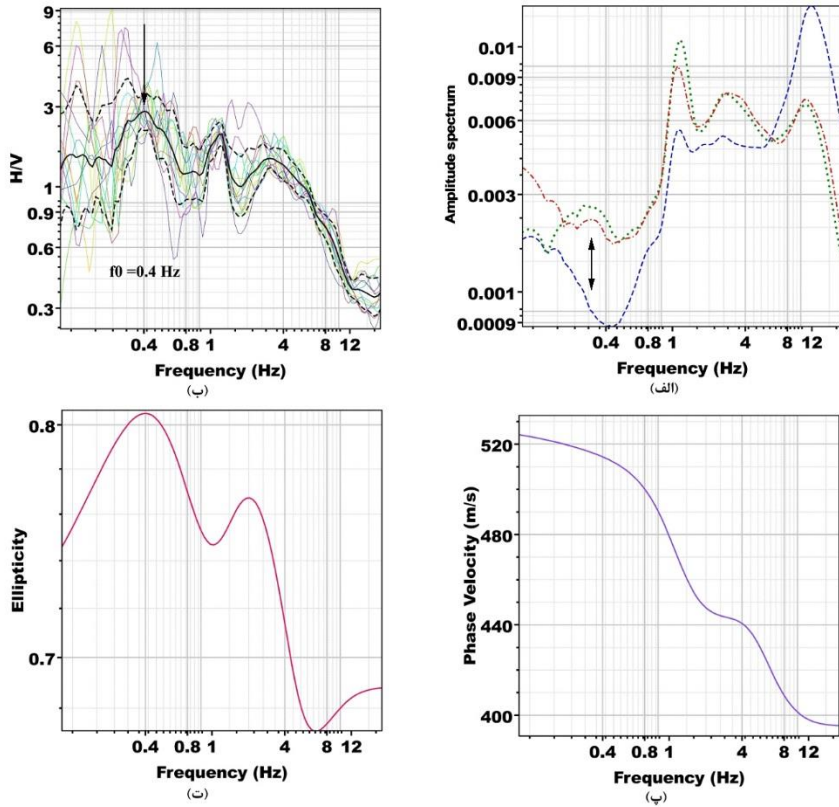
که در آن، H میانگین دامنه طیف مؤلفه‌های افقی، $N(f)$ دامنه طیف مؤلفه شمالی-جنوبی و $E(f)$ دامنه طیف مؤلفه شرقی-غربی است. همچنین، به منظور هموار کردن طیف

مدل‌سازی شده است (شکل‌های ۵-ت و ۶-ت). چنانکه در هر دو ایستگاه مشاهده می‌شود، بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه منطبق بر اولین بیشینه مربوط به مد اصلی موج ری‌لی است. براساس تحقیق حق‌شناس (۲۰۰۵) بیشینه مشاهده شده در بسامد ۱/۳ هرتز در ایستگاه‌های تهران دارای منشأ صنعتی است و نباید در تفسیر منحنی‌های H/V مورد توجه قرار گیرد.

بودن لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با مدل‌سازی منحنی بیضی‌واری موج ری‌لی، ارتباط بین مد اصلی موج ری‌لی و بیشینه منحنی H/V بررسی شده است. منحنی پاشش سرعت فاز موج ری‌لی حاصل از مدل‌های زمین (جدول‌های ۲ و ۳)، گویای پاشنده بودن لایه‌های زیرین دو ایستگاه AZP و MOF است (شکل‌های ۵-پ و ۶-پ). مد اصلی موج ری‌لی نیز، با استفاده از همین مدل‌های زمین



شکل ۵. (الف) نمودار طیف دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم مربوط به ایستگاه AZP؛ نقطه‌چین سبز، طیف دامنه مؤلفه N؛ نقطه‌چین سرخ، طیف دامنه مؤلفه E و خط‌چین آبی، طیف دامنه مؤلفه Z را نشان می‌دهد، (ب) نمودار نسبت طیفی H/V؛ خط ضخیم مشکی، منحنی H/V؛ خط‌چین‌های مشکی، انحراف استاندارد و خطوط رنگی، H/V مربوط به هر پنجره زمانی را نشان می‌دهند، (پ) منحنی پاشش سرعت فاز موج ری‌لی و (ت) منحنی بیضی‌واری مد اصلی موج ری‌لی.



شکل ۶. الف) نمودار طیف دامنه مؤلفه‌های افقی و قائم مربوط به ایستگاه MOF؛ نقطه چین سبز، طیف دامنه مؤلفه N؛ نقطه خط چین سرخ، طیف دامنه مؤلفه E و خط چین آبی، طیف دامنه مؤلفه Z را نشان می‌دهد، (ب) نمودار نسبت طیفی H/V؛ خط ضخیم مشکی، منحنی H/V؛ خط چین‌های مشکی، انحراف استاندارد و خطوط رنگی، H/V مربوط به هر پنجره زمانی را نشان می‌دهد، (پ) منحنی پاشش سرعت فاز موج ری‌لی و (ت) منحنی بیضی‌واری مد اصلی موج ری‌لی.

جدول ۱-الف. جنس لایه‌ها و عدد آزمایش نفوذ استاندارد میانگین (جایکا و سست، ۲۰۰۰).

نام خاک	رُس نرم	رُس نیمه‌سخت	رُس سخت	رُس خیلی سخت
علامت	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
مقدار میانگین N	15	35	75	100
نام خاک	رُس نرم و ماسه	رُس نیمه‌سخت و ماسه	رُس سخت و ماسه	رُس خیلی سخت و ماسه
علامت	CS ₁	CS ₂	CS ₃	CS ₄
مقدار میانگین N	15	35	75	100
نام خاک	ماسه نامتراکم	ماسه نیمه‌متراکم	ماسه متراکم	ماسه خیلی متراکم
علامت	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
مقدار میانگین N	15	35	75	100
نام خاک	شن نامتراکم	شن نیمه‌متراکم	شن متراکم	شن خیلی متراکم
علامت	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄
مقدار میانگین N	15	35	75	100

جدول ۱-ب. تغییرات عمق و جنس لایه‌ها برای مدل‌های زمین داده شده در شکل ۴ (جایکا و سست، ۲۰۰۰). نیم‌رخ‌های مورد استفاده با رنگ زرد نشان داده شده است.

شماره مدل	عمق (GL-m)																										
	۵	۱۰	۱۵	۱۵	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												
۸	C1	C1	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	CS3	C4												
۹	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C4												
۱۰	C1	C1	CS2	CS2	CS2	CS2	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C4												
۱۱	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	C2	C2	C2	C2	C4												
۱۲	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4																
۱۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۱۴	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																
۱۵	CS1	CS1	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۱۶	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۱۷	C2	C2	CS1	CS1	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۱۸	G2	G2	CS1	CS1	CS1	CS1	G3	G3	G3	G3	G4																
۱۹	C3	C3	C3	C3	C3	C3	G3	G3	G3	G3	G4																
۲۰	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۲۱	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																
۲۲	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C4																				
۲۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4																				
۲۴	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																				
۲۵	C1	C1	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																				
۲۶	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																				
۲۷	G2	G2	G4	G4	G3	G3	G4																				
۲۸	C2	C2	G3	G3	G3	G3	G4																				
۲۹	S3	S3	S3	S3	S3	S3	G4																				
۳۰	S3	S3	G3	G3	G3	G3	G4																				
۳۱	G3	G3	G3	G3	G3	G3	G4																				
۳۲	G2	G2	G3	G3	G3	G4																					
۳۳	G3	G3	G3	G3	G3	G4																					
۳۴	G3	G3	G3	G3	G4																						
۳۵	S3	S3	S3	G4																							
۳۶	CS3	CS3	CS3	G4																							
۳۷	C1	C1	C1	G4																							
۳۸	C2	C2	C2	G4																							
۳۹	G3	G3	G4																								
۴۰	Pre-Miocene																										
۴۱	Rock																										

یک مقدار بیشینه محلی و دامنه طیف مؤلفه قائم به یک مقدار کمینه محلی رسیده‌اند. با توجه به نظر محققان در این زمینه (برای نمونه، لاچت و بارد، ۱۹۹۴؛ کونو و اوماچی، ۱۹۹۸؛ بارد، ۱۹۹۸) و غالب بودن موج‌های ری‌لی در میدان موج ریزلرزه‌ها، این تغییر، می‌تواند نشان‌دهنده تغییر حالت حرکت ذرات موج ری‌لی از پسگرد به پیشگرد در نتیجه محو شدن مؤلفه قائم و خصوصیات بیضی‌واری موج‌های ری‌لی باشد.

منحنی‌های بیضی‌واری موج ری‌لی با استفاده از مدل زمین حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) مدل‌سازی شد. مقایسه منحنی‌های مدل‌سازی شده بیضی‌واری موج‌های ری‌لی با منحنی‌های H/V روشن می‌سازد که منحنی‌های بیضی‌واری در حوالی بسامد تشدید ساختگاه، بیشینه‌ای منطبق با بیشینه H/V نشان می‌دهند. رفتار بیضی‌واری ذرات در میدان موج ریزلرزه‌ها و همچنین، هم‌خوانی اولین بیشینه مربوط به مد اصلی موج‌های ری‌لی و بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه، نشان‌دهنده این است که در جنوب شهر تهران، مد اصلی موج‌های ری‌لی توجیه‌کننده بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه است.

مراجع

جعفری، م. ک.، رزمخواه، آ.، کشاورز، م.، سهرابی، ع. و پورآذین، خ.، ۱۳۷۹، مطالعات تکمیلی ریزبهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (گزارش طرح پژوهشی). سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۵، نقشه زمین‌شناسی تهران. شعبانی، ا.، میرزایی، ن.، حق‌شناس، ا. و اسکندری قادی، م.، ۱۳۸۹، برآورد سرعت موج برشی با ترکیب روش‌های آرایه‌ای و وارون‌سازی منحنی‌های بیضی‌واری در ساختگاهی در جنوب شهر تهران، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۶(۴)، ۱-۱۳.

Abbasi M. R. and Shabanian, E., 1999, Evolution of the stress field in Tehran region during the Quaternary, Proc. 3rd Int. Conf., Seismology

جدول ۲. مدل زمین مورد استفاده برای مدل‌سازی منحنی بیضی‌واری موج ری‌لی در ایستگاه AZP (براساس مدل زمین شماره ۲۷).

Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ (kg/m ³)
10	733	431	2100
10	981	577	2200
10	905	532	2100
0	981	577	2200

جدول ۳. مدل زمین مورد استفاده برای مدل‌سازی منحنی بیضی‌واری موج ری‌لی در ایستگاه MOF (براساس مدل زمین شماره ۶).

Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ (kg/m ³)
30	733	431	2000
50	905	532	2000
45	733	431	2100
0	981	577	2200

۶ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه‌ها در دو ایستگاه ثبت ریزلرزه‌ها در جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار جنبش ذره، نگاشت ریزلرزه‌ها در پنجره‌های زمانی بسیار کوتاه (در حد چند دهم ثانیه) در نظر گرفته شد و نحوه تغییرات رفتار جنبش ذره مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها رفتار بیضی‌وار حرکت ذرات در میدان موج ریزلرزه‌ها را نشان می‌دهد. این رفتار بیضی‌وار جنبش ذرات را می‌توان به غالب بودن موج‌های ری‌لی در میدان موج ریزلرزه‌ها نسبت داد.

با بررسی طیف دامنه و منحنی‌های نسبت طیفی H/V ریزلرزه‌ها، مقادیر عددی بسامد تشدید برای ایستگاه‌های ثبت ریزلرزه‌ها محاسبه شدند. این مقادیر در جنوب شهر تهران در بازه بسامدی ۰/۳ تا ۵ هرتز قرار دارد. بررسی طیف دامنه و منحنی‌های H/V حاصل از اندازه‌گیری ریزلرزه‌ها نشان می‌دهد که در حوالی بسامد تشدید ساختگاه در ایستگاه‌های مورد تحقیق، دامنه طیف مؤلفه‌های افقی به

- sismique à Téhéran: premiers résultats d'une étude expérimentale, 6ème colloque national AFPS, 2003, Paris France.
- JICA (Japan International Cooperation Agency) and CEST (Centre for Earthquake and 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.
- Konno, K. and Ohmachi, T., 1998, Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 228-241.
- Lauchet, C. and Bard, P. Y., 1994, Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitation of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth*, **42**, 377-397.
- Lay, T. and Wallace, T. C., 1995, Modern global seismology, Academic Press, San Diego.
- Murphy, J. R. and Shah, H. K., 1988, An analysis of the effects of site geology on the characteristics of near-field Rayleigh waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 64-82.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR. RTRI.*, **30**, 25-33.
- Nakamura, Y., 2000, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, Proc. 12th World Conf. Earthq. Eng., Auckland, New Zealand.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971, On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with English abstract), *J. Seism. Soc. Japan*, **24**, 26-40.
- and Earthquake Engineering (SEE-3), 67-84, Tehran, Iran.
- Asten, M. W., 2004, Comment on "Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee" by Paul Bodin, Kevin Smith, Steve Horton and Howard Hwang, *Eng. Geol.*, **72**, 334-343.
- Bard, P. Y., 1998, Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?, Proc. 2nd Int. Symp., effects of surface geology on seismic motion, Yokohama, Japan, 1251-1279.
- Bodin, P., Smith, K., Horton, S. and Hwang, H., 2001, Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee, *Eng. Geol.*, **2**, 159-168.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F. and Bard, P. Y., 2006, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies, *Earth. Sci. Rev.*, **79**, 205-227.
- Borcherdt, R. D., 1970, Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.
- Cornou, C., Bard, P. Y. and Dietrich, M., 2003, Contribution of dense array analysis to basin-edge-induced waves identification and quantification. Application to Grenoble basin, French Alps (II), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 2624-2648.
- Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D., 2001, A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.*, **145**, 535-549.
- Haghshenas, E., 2005, Condition géotechniques et aléa sismique local à Téhéran, Ph.D thesis, Joseph Fourier University, Grenoble, France.
- Haghshenas, E., Bard, P. Y., Jafari, M. K. and Hatzfeld, D., 2003, Effets de site et risqué