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

مهرداد فتوحى مهر'، الهام شعباني"، نوربخش ميرزائي" و ابراهيم حقشناس

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران ۲استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران ۲ 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: ۹۲/۱۱/۲۸)

چکیدہ

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 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 مُد اصلی موج ریلی منطبق بر بسامد تشدید ساختگاه است.

واژه های 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, microtermor 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

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؛ لاچت و بارد، ۱۹۹۴؛ کورنو و همکاران، ۲۰۰۳). اثر تقویت ساختگاه با وابستگی بسامدی، بیان کمّی اثر ساختگاه یا به عبارتی جنبش زمین مرتبط با شرایط زمینشناسی سطحی، از اهداف اصلی تحقیقات زلزلهشناسی مهندسی و برآورد خطر زمین لرزه است (به عنوان نمونه، بوچرت، ۱۹۷۰؛ شعبانی و همکاران، ۱۳۸۹). این مسئله از آن جهت حائز اهمیت است که با افزایش

مقدمه

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 مېتنى بر اندازه گيرى ريزلرزەھا بسيار مورد توجه قرار گرفته است (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶). این روش ها به علت سادگی، کمهزینه بودن و غیر مخرب بودن در مناطق شهری، در مقایسه با روش های شبیه سازی عددی همراه با روش های 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 می کشد تا داده های مناسب با نسبت سیگنال به نوفه زیاد جمع آوری شوند، استفاده از ریزلرزهها بسیار سودمند خواهد بود (بونفوی-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶). در نتيجه، شناخت ماهيت ميدان موج ريزلرزهها داراي اهميت 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 همكاران، 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 لاو در میدان موج ریزلرزهها وجود ندارد (بونفوي-کلاودت و همکاران، ۲۰۰۶).

روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) (نو گوشی 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

ريزلرزهها موجهای غالب هستند، درصورتی که تباين امپدانس 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 میسیسی بی به انجام رساندند، با مقایسه بیشینه های مشاهده شده روی نمودار طیفی مؤلفه افقی به قائم ریزلرزهها و منحنی طیف دامنه مؤلفههای افقی و قائم، دوره تناوب اصلي تشديد ساختگاه را بررسي كردند. آنها روشن ساختند كه، در دوره تناوب تشديد ساختگاه، دامنه طيف مؤلفههاي افقى به مقدار بيشينه و دامنه طيف مؤلفه قائم به مقدار كمينه 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 مي توان با فرض غالب بودن موجهاي ريلي تفسير كرد.

در این تحقیق، ابتدا، رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه ادر جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، با استفاده از اندازه گیری های تکایستگاهی ریزلرزه ادر جنوب شهر تهران، بیشینه های منحنی های H/V در هر ایستگاه تعیین شده است. سپس، با بررسی پاشنده بودن ساختار لایه های زیر سطحی هر ایستگاه، با مدل کردن جنبش بیضی وار موج های ری لی، بیشینه نسبت H/V مربوط به بسامد اصلی تشدید و اولین بیشینه مد اصلی موج های ری لی مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که در جنوب شهر تهران مد اصلی موج های ری لی توجیه کننده بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه است. گرفته است. شکل ۱ موقعیت دو ایستگاه انتخاب شده برای پژوهش حاضر به نامهای AZP (پارک آبی آزادگان) و MOF (بیمارستان مفرح در منطقه خانیآباد) را در جنوب شهر تهران با مثلثهای سرخ رنگ روی نقشه زمین شناسی تهران نشان می دهد. برای پردازش دادهای ریزلرزهها از نرمافزار www.geopsy.org) استفاده شده است.

۲ ثبت ریزلرزهها در جنوب شهر تهران در این تحقیق از دادههای اندازه گیری شده با یک شبکه لرزهنگاری موقت ۱۴ ایستگاهی، نصب شده در سال ۲۰۰۲ در تهران (حق شناس و همکاران، ۲۰۰۳؛ حق شناس، ۲۰۰۵) استفاده شده است. اندازه گیریها در طول پنج ماه به طور مستمر با لرزه سنجهای سه مؤلفه ای CMG-40T صورت



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.

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

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



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

۶

(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).

همان گونه که مشاهده می شود مطابق با نقشه مدل های زمین (شکل ۴)، ایستگاه AZP در جنوب شرق تهران به طور غالب از نهشته های درشت دانه شنی تشکیل شده است و عمق سنگ بستر لرزهای نیز کم (۴۰ متر) است. اما، در محل ایستگاه MOF نیم رخ خاک بیشتر از نوع رُسی و رُسی ماسه ای با سختی متوسط است و عمق سنگ بستر لرزه ای نیز زیاد (۱۵۰ متر) بر آورد شده است. این شرایط خاک با وضعیت زمین شناسی و زمین ریخت شناسی این دو ایستگاه (افزایش عمق آبرفت و کاهش اندازه دانه ها از شرق به غرب با افزایش فاصله از ارتفاعات) به خوبی هم خوانی دارد. ۲ مدلسازی منحنی بیضیواری موج ریلی در حالت حضور همزمان موجهای P و VS، بیضیواری موج ریلی، 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 موج ریلی 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 شدهٔ جایکا و سست (۲۰۰۰)، برای استخراج این گزارش براساس جمع آوری اطلاعات گمانههای حفاری شده در طرحهای عمرانی و حفاریهای صورت آمده مدار N بواساس مقدار N



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

مدل های زمین عرضه شده در گزارش جایکا و سست (۲۰۰۰) شامل اطلاعات ضخامت و جنس لایه ها است (جدول ۱-ب). برای مدل سازی منحنی های بیضی واری موج های ری لی 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، دسته بندی جنس لایه های زیر ایستگاه های مورد بررسی بر اساس عدد آزمایش نفوذ ایستاندارد (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

$$V_s = 161 \, N^{0.277} \quad N < 200 \tag{1}$$

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

$$V_P = \sqrt{3} V_S \tag{(Y)}$$

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

۵ تحلیل داده های اندازه گیری تک ایستگاهی ریزلرزه ها با محاسبه طیف فوریه دامنه ریزلرزه ها برای هر سه مؤلفه شمالی - جنوبی، شرقی - غربی و قائم در هر ایستگاه و میانگین گیری از طیف دامنه مربوط به دو مؤلفه افقی و محاسبه نسبت این میانگین به طیف دامنه مؤلفه قائم، طیف محاسبه نسبت این میانگین به طیف دامنه مؤلفه قائم، طیف الا مربوط به هر پنجره زمانی اعمال شده روی نگاشت، تعیین شده است. برای میانگین گیری از طیف فوریه دامنه دو مؤلفه افقی از روش جذر میانگین مربعات به صورت زیر استفاده شده است:

$$H = \sqrt{\frac{N(f)^2 + E(f)^2}{2}} \tag{(\ref{eq:prod})}$$

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، بهمنظور هموار کردن طیف

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

 $W_B(f, f_c) = \tag{(f)}$

 $[Sin(log(f/f_c)^b)/(log(f/f_c)^b)]^4$

که در آن، b ضریب پهنای باند، f بسامد موردنظر و f بسامد مرکزی است. از آنجاکه این تابع، یک تابع لگاریتمی است، با افزایش دوره تناوب شکل تابع ثابت میماند 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.

بهاین ترتیب ابتدا، منحنی های طیف دامنه مؤلفه های افقی و قائم ریزلرزهها و سپس، منحنیهای نسبت طیف مؤلفه افقى به قائم (H/V) در هر ايستگاه بررسى شده است. بررسي تغييرات طيف دامنه مؤلفههاي افقي و قائم ريزلرزهها در ایستگاههایAZP و MOF نشاندهنده تغییر روند ناگهانی بهترتیب، در بسامدهای ۴/۸ و ۴/۰ هرتز است (شکل های ۵-الف و ۶-الف). با توجه به غالب بودن موج رىلى در ميدان موج ريزلرزەھا، اين تغيير نشاندھندە تغيير 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 هر تز در ایستگاه AZP و ۰/۴ هر تز در ایستگاه MOF نشان میدهد 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 مدل های زمین، پاشنده

بودن لایه 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 مدل های زمین (جدول های ۲ و ۳)، گویای پاشنده بودن لایه های زیرین دو ایستگاه AZP و MOF است (شکل های ۵-پ و ۶-پ). مد اصلی موج ریلی نیز، با استفاده از همین مدل های زمین

مدلسازی شده است (شکلهای ۵-ت و ۶-ت). چنانکه در هر دو ایستگاه مشاهده می شود، بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه منطبق بر اولین بیشینه مربوط به مد اصلی موج ری لی است. براساس تحقیق حق شناس (۲۰۰۵) بیشینه موج ری لی است. براساس تحقیق حق شناس (۲۰۰۵) بیشینه موج ری لی است. براساس تحقیق می مناس (۲۰۰۵) می موج ری لی است. براساس تحقیق می مناس (۲۰۰۵) مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۵. (الف) نمودار طیف دامنه مؤلفههای افقی و قائم مربوط به ایستگاه AZP؛ نقطهچین سبز، طیف دامنه مؤلفه N؛ نقطه خطچین 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؛ نقطهچین سبز، طیف دامنه مؤلفه N؛ نقطه خطچین 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 میدهد، (پ) منحنی پاشش سرعت فاز موج ریلی و (ت) منحنی بیضیواری مد اصلی موج ریلی.

رُس خیلی سخت	رُس سخت	رُس نيمەسخت	رُس نرم	نام خاک			
C4	С3	C2	C1	علامت			
100	75	35	15	مقدار میانگین N			
رُس خیلی سخت و ماسه	رُس سخت و ماسه	رُس نیمهسخت و ماسه	رُس نرم و ماسه	نام خاک			
CS4	CS ₃	CS ₂	CS1	علامت			
100	75	35	15	مقدار میانگین N			
ماسه خیلی متراکم	ماسه متراكم	ماسه نيمهمتراكم	ماسه نامتراكم	نام خاک			
S 4	S 3	S_2	S1	علامت			
100	75	35	15	مقدار میانگین N			
شن خیلی متراکم	شن متراكم	شن نيمەمتراكم	شن نامتراكم	نام خاک			
G4	G3	G ₂	G1	علامت			
100	75	35	15	مقدار میانگین N			

جدول ۱-الف. جنس لايهها و عدد أزمايش نفوذ استاندارد ميانگين (جايكا و سست، ٢٠٠٠).

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.

	(GL-m) عمق																									
شماره مدل	۵	۱.	۱۵	۱۵	۲۵	۳۰	۳۵	۴.	۴۵	۵۰	۵۵	۶.	۶۵	٧٠	۷۵	٨٠	۸۵	٩٠	٩٥	۱	۱۱۰	17.	۱۳۰	14.	۱۵۰	
١	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	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	C4
۴	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	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	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	C4
۶	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4									
v	C1	C1	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C3	C3	C3	C3	C4											
٨	C1	C1	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	CS3	C4											
٩	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											
11	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	C2	C2	C2	C2	C4											
١٢	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4															
۱۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4															
14	C2	C2	C2	C2	C2	C2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4															
10	CS1	CS1	C2	C2	C2	C2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4															
18	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															
۲.	C2	C2	C3	C3	C3	C3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4															
۲۱	CS2	CS2	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4															
77	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C4																			
۲۳	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C4																			
74	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																			
۲۵	C1	C1	CS2	CS2	CS2	CS2	CS4																			
46	CS1	CS1	CS3	CS3	CS3	CS3	CS4																			
۲۷	G2	G2	G4	G4	G3	G3	G4																			
۲۸	C2	C2	G3	G3	G3	G4																				
۲۹	S 3	G4																								
٣.	S 3	S 3	G3	G3	G3	G4																				
۳۱	G3	G3	G3	G3	G3	G4																				
۳۲	G2	G2	G3	G3	G4																					
۳۳	G3	G3	G3	G3	G4																					
44	G3	G3	G3	G4																						
۳۵	S 3	S 3	S 3	G4																						
۳۶	CS3	CS3	CS3	G4																						
٣٧	C1	C1	C1	G4																						
۳۸	C2	C2	C2	G4																						
۳٩	G3	G3	G4		I																					
۴.	Pre	-Mioc	ene																							
41		Rock																								

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

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 نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، رفتار جنبش ذره در میدان موج ریزلرزه ها در دو ایستگاه ثبت ریزلرزه ها در جنوب شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی رفتار جنبش ذره، نگاشت ریزلرزه ها در پنجره های زمانی بسیار کوتاه (در حد چند دهم ثانیه) در نظر گرفته شد و نحوه تغییرات رفتار جنبش ذره مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ها رفتار بیضی وار حرکت ذرات در میدان موج ریزلرزه ها را نشان می دهد. این رفتار بیضی وار جنبش ذرات را می توان به غالب بودن موج های ریلی در میدان موج ریزلرزه ها نسبت داد.

H/V ریزلرزهها، مقادیر عددی بسامد تشدید برای ایستگاههای ریزلرزهها، مقادیر عددی بسامد تشدید برای ایستگاههای ثبت ریزلرزهها محاسبه شدند. این مقادیر در جنوب شهر تهران در بازه بسامدی ۲۰/۳ تا ۵هرتز قرار دارد. بررسی طیف دامنه و منحنیهای H/V حاصل از اندازه گیری ریزلرزهها نشان میدهد که در حوالی بسامد تشدید ساختگاه در ایستگاههای مورد تحقیق، دامنه طیف مؤلفههای افقی به

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 نشان دهنده تغییر حالت حرکت ذرات موج ریلی از پسگرد به پیشگرد در نتیجه محو شدن مؤلفه قائم و خصوصیات بیضیواری موجهای ریلی باشد.

منحنی های بیضی واری موج ری لی با استفاده از مدل زمین حاصل از تحقیقات جایکا و سست (۲۰۰۰) مدل سازی شد. مقایسه منحنی های مدل سازی شده بیضی واری موج های ری لی با منحنی های H/V روشن می سازد که منحنی های بیضی واری در حوالی بسامد تشدید ساختگاه، بیشینه ای منطبق با بیشینه H/V نشان می دهند. رفتار بیضی واری ذرات در میدان موج ریزلرزه ها و همچنین، هم خوانی اولین بیشینه مربوط به مد اصلی موج های ری لی و بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه، نشان دهنده این است که در جنوب شهر تهران، مد اصلی موج های ری لی توجیه کننده بیشینه مربوط به بسامد تشدید ساختگاه است.

مراجع

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