

## تعیین بسامد طبیعی نوسان خاک در محدوده معدن مس سرچشمه با استفاده از نگاشت‌های مایکروترمور

وحید غلامی<sup>۱\*</sup>، نصرالله کامالیان<sup>۲</sup> و مهدی زارع<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۸۵/۶/۲۰، پذیرش نهایی: ۸۷/۴/۳)

### چکیده

در این بررسی داده‌های مایکروترمور جمع‌آوری شده، در محدوده معدن مس سرچشمه به منظور محاسبه بسامد طبیعی خاک، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به منظور پردازش داده‌ها از روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی، معروف به رهیافت ناکامورا (H/V) استفاده شده است. روش نسبت‌های طیفی امکان کاربرد روی داده‌های زلزله و شتاب را دارد ولی براساس بسیاری از بررسی‌ها، روشن شده است که استفاده از مایکروترمورها برای محاسبه بسامد طبیعی کاملاً قابل اطمینان است. داده‌های موجود در ۱۲ جایگاه اندازه‌گیری در محدوده معدن مس سرچشمه و برخی نقاط اطراف به منظور مطالعات نوفه سنجی برداشت شده‌اند. در برخی جایگاه‌های اندازه‌گیری تعداد دفعات برداشت داده ۳ و در برخی جایگاه‌ها ۴ بار بوده است. داده‌ها بر اساس استانداردهای گروه طرح SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) مورد پردازش قرار گرفته است. در هر جایگاه محاسبات روی همه برداشت‌ها صورت گرفته و بسامد طبیعی برای آن جایگاه محاسبه شده است. براساس بسامد طبیعی به‌دست آمده، دسته‌بندی رده خاک و متوسط سرعت موج برشی برآورد شده است. در نهایت نوع و رده خاک با مشاهدات میدانی موجود مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: مایکروترمور، معدن مس سرچشمه، رهیافت ناکامورا، بسامد طبیعی

## Determination of natural frequency of soil vibration in Sarcheshmeh copper mine, using microtremor records

Gholami, V<sup>1</sup>., Kamalian, N<sup>2</sup>. and Zare, M<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>M.Sc. student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Associate professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 11 Sep 2006, Accepted: 23 Jun 2008)

### Abstract

It is well known that ground-shaking site effect caused by an earthquake can vary significantly within a small distance. This is because at sites having soft soil and/or topographic and basement undulations, seismic energy gets trapped, leading to amplification of vibration that may cause considerable damage to man-made structures.

Theoretical analysis and observational data have shown that each site has a specific resonance frequency at which ground motion gets amplified. Man-made structures having resonance frequency matching that of the site have the maximum likelihood of getting damaged. Hence, in order to construct seismically-safe structures, it is important to know the site response.

Various methods are available for the estimation of site response. The best method is to record strong ground motion caused by a large local earthquake. However, fortunately such events are not very frequent in many areas. Hence, for site response analysis, this method is not very practical. Another method is to carry out extensive seismic reflection and/or refraction surveys and geotechnical surveys; this method is extremely expensive and time-consuming. Recently microtremor data have also been widely used for estimation of site response. The advantage of this method is that it takes very little time for data collection. One does not have to wait for an earthquake to occur. Very few instruments are required; the data collection can be handled even with a single instrument.

The method involves recording microtremor data from the site to be investigated. It is assumed that signals from a hard rock site are carried equally well at all frequencies. On the other hand, a soft-soil site amplifies the signal at its resonance frequency, which depends on factors such as the soil type, basement configuration, etc. Hence, if the source and the path effects were removed from the spectra of the signal, then we should get a flat spectra at a hard-rock site and spectra showing peaks at resonance frequency at a soft-soil site.

In this study microtremor measurements were carried out in the Sarcheshmeh copper mine area at about 12 sites and the natural frequency at each site was estimated considering the main peak in the spectral ratio between the horizontal and the vertical component, the method called the NAKAMURA technique (H/V). Many experimental and theoretical studies have shown the reliability of microtremor measurements in site predominant frequency estimation. At each site traces have been collected 3 or 4 times and for all of them natural frequency based on SESAME project group standards have been analyzed. Then on the basis of natural frequency, site soil types have been determined and average Shear wave velocity for each site has been predicted. All results compared with available field observations.

**Key words:** Microtremor, Sarcheshmeh copper mine, Nakamura technique, Natural frequency

## ۱ مقدمه

نهشته‌هایی که اکثر محیط‌های مسکونی روی آنها شکل گرفته‌اند (میت و دیکمن، ۲۰۰۳). تعیین بسامد (دوره) طبیعی ((Natural Frequency (Period)) مناطق پیش گفته، محققان را به این باور رسانده است که بسامد طبیعی لایه‌های آبرفتی موجود، با بسامد امواج لرزه‌ای رسیده به محل انطباق دارد و لذا سبب تشدید حرکت شده است (لرمو و همکاران، ۱۹۸۸). از این رو بررسی بسامد طبیعی، در حین ساخت سازه‌های پر اهمیت، ضرورت خود را

امروزه به روشنی پذیرفته شده است که بخش مهمی از تخریب حاصل از زمین‌لرزه‌های بزرگ، به ویژگی‌ها و اثرات ساختگاه محلی مرتبط است. از معروف‌ترین زمین‌لرزه‌هایی که این اثر را نشان داده‌اند زلزله سال ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی است. هر چند که رومرکز این زلزله فاصله قابل توجهی از شهر داشت ولی موجب تخریب بسیار زیادی شد. علت عمده این تخریب، تشدید امواج لرزه‌ای با نهشته‌های آبرفتی منطقه ذکر شده است،

دیگر روش‌های معمول، بهبود چشمگیری است که استفاده از آنها در صرف زمان، هزینه و همچنین سهولت کار ایجاد کرده است. از منابع مولد آنها می‌توان به دو دسته کلی، طبیعی، مانند باد، برخورد امواج دریاها و اقیانوس‌ها با ساحل و همچنین مصنوعی، مانند عبور مرور انسان‌ها، ترافیک و ارتعاشات ماشین‌های صنعتی و مانند آن اشاره کرد. بررسی و مشاهدات فراوان روی مایکروترموها روشن می‌سازد که امواج مایکروترمو مشکل از هر دو نوع موج شناخته شده در زلزله‌شناسی، یعنی امواج حجمی و امواج سطحی هستند.

### ۳ بسامد طبیعی و اثرات ساختگاه (خاک)

بسیاری از زمین‌لرزه‌های مخرب دهه‌های اخیر که از جمله آنها می‌توان به زلزله‌های مکزیکوسیتی ۱۹۸۵، نورث ریچ ۱۹۹۴، کالیفرنیا ۱۹۸۹، فیلیپین ۱۹۹۰، اسپیتاک ارمنستان ۱۹۸۸، کوبه ژاپن ۱۹۹۵، ترکیه ۱۹۹۹ و بم ۲۰۰۳ اشاره کرد، به روشنی مشخص ساخته‌اند که شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی سطحی، نقش مهمی در تقویت میزان جنبش نیرومند زمین بازی می‌کند (میت و دیکمن، ۲۰۰۳؛ فاه و همکاران، ۱۹۹۷). این موضوع سبب شده است که بررسی پاسخ خاک نرم به زلزله از اهمیت زیادی برخوردار شود و یکی از اقدامات اساسی در طراحی سازه به شمار بیاید. ارزیابی شرایط محلی و اثر آن بر ویژگی‌های حرکت زمین، در حین رخداد زمین‌لرزه، نقش مهمی در تعیین اثرات ساختگاه در مهندسی ژئوتکنیک ایفا می‌کند. بر این اساس اثرات ساختگاه (خاک) به منظور تعدیل و کنترل اثرات لرزه‌ای، طراحی و برنامه‌ریزی در طی رخداد زمین‌لرزه، برای ساختگاه‌های بحرانی و حساس مورد استفاده قرار می‌گیرد و از اهداف اصلی برنامه‌های کاهش خطرات زلزله به شمار می‌رود (بارد، ۱۹۹۹). علت اصلی تقویت و تشدید امواج لرزه‌ای، به دام افتادگی (wave trapping) آنها به دلیل جدایش آکوستیکی بین

نشان می‌دهد. در این تحقیق به بررسی و محاسبه بسامد طبیعی براساس داده‌های مایکروترمو در محدوده معدن مس سرچشمه پرداخته شده است.

### ۲ ماهیت مایکروترموها و دلیل استفاده از آنها

مایکروترموها با دوره‌های زمانی در محدوده یک تا بیست ثانیه را، اولین بار در ۱۹۰۸ اموری (اموری، ۱۹۰۸) مشاهده کرد. در گذشته بیشتر تحقیقات مربوط به آنها به بررسی منشأ و خصوصیات این امواج می‌پرداخت و فقط در موارد اندکی از این امواج به مثابه وسیله‌ای برای فهم خصوصیات دینامیکی زمین استفاده می‌شد. امروزه کاربردهای فراوانی برای این امواج پیدا شده و در بحث‌های متفاوتی مانند: اثرات تقویت محلی برای زمین‌لرزه، تعیین عمق سنگ بستر، برآورد سرعت موج برشی، تعیین نوع (رده) خاک ساختگاه و همچنین محاسبه ضریب آسیب‌پذیری (vulnerability index) در یک محل از آنها استفاده می‌شود. مایکروترموها در اصل امواجی هستند که از درون لایه‌های خاک در هر ساختگاهی عبور می‌کنند، بنا بر نوع خاک آن ساختگاه اثر می‌پذیرند و در نهایت روی یک لرزه‌نگار ثبت می‌شوند. لذا این امواج به نوعی متأثر از مشخصات خاک ساختگاه هستند. این امواج در سطح زمین تولید شده و پس از برخورد به لایه‌ای (مانند سنگ بستر) که سرعت موج برشی در آن زیاد است به سمت محل مورد نظر بازگشته و اطلاعات مسیر طی شده را با خود حمل می‌کنند (چاوز گارسیا و همکاران، ۱۹۹۶). روی سطح زمین، یک دستگاه لرزه‌نگار که توان تقویت امواج تا حد ۱۰۰ برابر را داشته باشد می‌تواند ارتعاشات خفیف زمین (مایکروترمو) را به طور مستمر ثبت کند. این امواج دارای دامنه‌های کوچکی در حدود ۲ تا ۵ میکرون‌اند و تقریباً همواره با شدت یا ضعف حضور دارند. از مهم‌ترین علل استفاده از این امواج و مقبولیت آنها در مقایسه با

بستر ( $H_b$ ) در نزدیکی محل مورد نظر به دست می‌آید و به نسبت طیفی استاندارد (Standard Spectral Ratio, SSR) معروف است:

$$SSR = \frac{H_s}{H_b} \quad (1)$$

این روش نیازمند دسترسی به داده هم زمان ثبت شده از یک رخداد روی ساختگاه هدف و ساختگاه مرجع است که معمولاً چنین اطلاعاتی بسیار کم در دسترس هستند.

ناکامورا (۱۹۸۹) رهیافت خود را بر مبنای روش فوق و با دیدگاهی بسیار ساده‌تر به همراه پیش‌فرض‌های زیر ارائه کرد:

۱- مایکروترموورها از امواج گوناگون (حجمی و سطحی) تشکیل شده‌اند.

۲- موج ریلی بر مایکروترموورها تأثیر گذار است ولی اثر آن که با  $E_{rw}$  نشان داده می‌شود، طیف عمودی در سطح ( $V_s$ ) را در مقایسه با طیف عمودی روی سنگ بستر ( $V_b$ ) بسیار کمتر متأثر می‌کند، و می‌توان اثر موج ریلی را به صورت تقسیم طیف محاسبه شده در سطح خاک به طیف عمق بستر خاک نشان داد:

$$E_{rw} = \frac{V_s}{V_b} \quad (2)$$

۳- مؤلفه عمودی حرکت مایکروترموورها به دلیل نوع حرکت، از ناهمسانگردی‌های لایه نرم خاک اثر چندانی نمی‌گیرد.

۴- اثر امواج ریلی روی حرکت مایکروترموورها برای مؤلفه‌های عمودی و افقی روی سنگ بستر یکسان است و برای یک محدوده وسیع بسامدی (۲۰-۰/۲ هرتز) نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی و عمودی حرکت در سنگ بستر (به دلیل تأثیر نداشتن بر هیچ یک از دو مؤلفه) نزدیک به یک است، یعنی:

$$\frac{H_b}{V_b} = 1 \quad (3)$$

رسوبات و سنگ بستر است. هرگاه رسوبات و ساختارهای مربوط، دارای لایه‌های افقی باشند، به دام افتادگی، فقط امواج حجمی را که به سمت بالا و پایین در سطح خاک حرکت می‌کنند تحت تأثیر قرار می‌دهد. زمانی که رسوبات سطحی ساختار ۲ یا ۳ بعدی را تشکیل می‌دهند، یعنی زمانی که دارای ناهمسانگردی جانبی باشیم (مثلاً تغییرات ضخامت داشته باشیم) این به دام افتادگی به امواج سطحی نیز سرایت می‌کند. تداخل این امواج به دام افتاده، منجر به رخداد الگوهای تشدید با بسامد مرتبط با ویژگی‌های هندسی و مکانیکی ساختار می‌شود. در حالی که این الگوهای تشدید در حالت تک‌بعدی بسیار ساده هستند، در مورد ۲ و ۳ بعدی بسیار پیچیده می‌شوند (بارد، ۱۹۹۹).

۴ روش محاسبه بسامد طبیعی، مبتنی بر نگاشت‌های مایکروترموور (روش ناکامورا)

هر سیگنال ثبت شده در یک ساختگاه، اثرات همزمان چشمه، مسیر و ساختگاه را با خود به همراه دارد (مولنار و کاسیدی، ۲۰۰۶) که به منظور تعیین اثر خاک، می‌بایست اثرات چشمه و مسیر را حذف کرد. به همین منظور و براساس ایده ارائه شده ناکامورا (۱۹۸۹) اثرات مسیر را می‌توان با نوع خاصی به هنجار کردن از روی مایکروترموورها حذف کرد. روش ناکامورا (نسبت‌های طیفی،  $H/V$ ) به منظور محاسبه بسامد طبیعی، که به نوعی بیانگر اثر ساختگاه نیز هست، از پر کاربردترین روش‌های کار با مایکروترموورها است. در این روش داده مایکروترموور به صورت تک ایستگاهی برداشت می‌شود و برای محاسبه بسامد طبیعی، نیازی به داشتن نگاشت‌های سرعت یا شتاب ندارد. اثرات ساختگاه به علت زمین‌شناسی سطحی معمولاً به صورت نسبت طیفی مؤلفه افقی نگاشت زلزله در سطح زمین روی لایه نرم خاک ( $H_s$ ) و مؤلفه هم‌زمان در یک رخنمون ایدئال از سنگ

رسوبات آبی رنگ در کف دره‌ها و جویبارها مورد توجه بوده است. این رسوبات نمک که سولفات مس‌اند، هم اکنون نیز در کف آبراهه‌های اطراف معدن قابل مشاهده‌اند. از لحاظ زمین‌شناسی معدن در بخش جنوب شرقی کمربند تکتونوماگمایی ایران مرکزی و در مجموعه آتشفشانی-رسوبی پاریز از کمربند دهج-ساردوئیه در استان کرمان جای گرفته است. در محدوده معدن، گسل‌هایی با روند شمالی-جنوبی وجود دارند. معدن در دامنه شمالی کوه مامرز قرار گرفته و سنگ‌های منطقه از کمپلکس‌های آتشفشانی-رسوبی، توده‌های نفوذی الیگومیوسن و گدازه‌های داسیتی کواترنر تشکیل شده است (گزارش نهایی مطالعات لرزه‌نگاری معدن مس سرچشمه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱).

#### ۶ داده‌های مورد استفاده

داده‌های مایکروترموور در طی سه روز از تاریخ ۱۳۸۰/۱۱/۲۸ تا ۱۳۸۰/۱۱/۳۰ با استفاده از دستگاه لرزه‌سنج SS-1 و دستگاه ثبت کننده SSR-1 برداشت شده‌اند. در هر ایستگاه سه یا چهار اندازه‌گیری با فاصله زمانی ۵ دقیقه، به صورت رقمی و با آهنگ ۲۰۰ نمونه در ثانیه برداشت شده است. حدود ۱۲ نقطه در شهرک مس سرچشمه، مجتمع کارخانه و معدن، سد رسوب‌گیر، گود احمر و پاریز در فواصل ۱۰ و ۱۵ کیلومتری معدن داده برداشت شده است. زمان برداشت داده‌ها به گونه‌ای (هنگام تعطیلی کار معدن) تنظیم شده که اثرات ناشی از معدن کاری روی داده‌ها ثبت نشود. در جدول ۱ تعداد دفعات و کیفیت داده‌های برداشت شده آمده است.

#### ۷ روند اجرای پردازش

برای پردازش داده‌ها از برنامه Jsesame استفاده شده که گروه طرح SESAME آن را به منظور پردازش داده‌های مایکروترموور با در نظر گرفتن همه نکات قابل توجه در

با این شرایط و با توجه به روابط (۱) تا (۳) نسبت طیفی بین مؤلفه افقی و عمودی نوفه زمینه ثبت شده در سطح خاک نرم، ما را به حذف اثرات امواج ریلی  $E_{rw}$  قادر می‌سازد.

$$\text{Site - Effect} = \frac{\text{SSR}}{E_{rw}} = \frac{H_s / H_b}{V_s / V_b} = \frac{H_s V_b}{V_s H_b} = \frac{H_s}{V_s} \quad (۴)$$

که در آن SSR (صورت کسر) همان نسبت طیفی استاندارد است که از راه محاسبه طیف مؤلفه افقی در سطح به طیف مؤلفه افقی در سنگ بستر به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه رابطه اخیر حاصل نسبت طیف مؤلفه افقی ( $H_s$ ) به طیف مؤلفه عمودی ( $V_s$ ) در تک ایستگاه اندازه‌گیری است. در عمل نسبت طیف  $H/V$  به صورت ترکیب طیفی دو مؤلفه افقی به مؤلفه عمودی تعریف می‌شود:

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{(N_s^2 + E_s^2)}{V_s^2}} \quad (۵)$$

که در آن  $N_s$  و  $E_s$  معرف طیف مؤلفه‌های افقی (شرقی-غربی و شمالی-جنوبی) و  $V_s$  بیانگر مؤلفه قائم (بالا-پایین) نگاشت ثبت شده در تک ایستگاه ما است. محاسبه این نسبت سبب رخداد یک پیک در منحنی دامنه طیفی می‌شود که از بسامد مرتبط با آن درحکم بسامد طبیعی یاد می‌شود.

#### ۵ وضعیت زمین‌شناسی منطقه برداشت داده

معدن مس سرچشمه با مختصات  $55^\circ 52' 20''$  طول شرقی و  $29^\circ 56' 40''$  عرض شمالی در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و ۵۰ کیلومتری رفسنجان قرار دارد. ارتفاع متوسط این ناحیه از سطح دریا ۲۶۲۰ متر است و بلندترین نقطه آن از سطح دریا ۳۲۸۰ متر ارتفاع دارد. این محل از قدیم به دلیل جاری بودن آب‌های زنگاری و تشکیل

جدول ۱. تعداد دفعات برداشت و کیفیت برداشت در هر جایگاه. (OK: داده‌های با کیفیت مناسب، N-OK: داده‌های با کیفیت نامناسب و N-D نبود برداشت داده را نشان می‌دهد).

سایت	برداشت اول	برداشت دوم	برداشت سوم	برداشت چهارم
احمر	OK	OK	OK	N-D
حراست	OK	OK	OK	OK
معدن	OK	OK	N-OK	OK
میدوک	OK	OK	OK	N-OK
مدیریت	OK	OK	OK	OK
ارکیده ۱	OK	N-D	N-D	N_D
ارکیده ۲	OK	OK	OK	OK
پاریز	OK	OK	OK	N-OK
رستوران	OK	OK	OK	OK
سد رسوب‌گیر	OK	OK	OK	OK
شهرک	OK	OK	N-OK	OK
تحقیقی	OK	OK	OK	OK
تعمیرگاه	OK	OK	OK	OK

- انتخاب پنجره‌هایی که دارای نوفه‌های گذرای (transients) آشکار نباشند.
- حذف قسمت‌های اشباع شده سیگنال که به دلیل حضور نوفه زیاد تشکیل می‌شود.
- تا حد امکان سعی شد که پنجره‌های انتخابی، در برگیرنده همه طول نگاشت باشند تا از به دست آمدن پاسخ‌های موضعی جلوگیری شود.
- طول پنجره‌های زمانی یکسان در نظر گرفته شد.
- از آنجا که انتخاب پنجره زمانی و به زبانی دیگر بریدن سیگنال، در پردازش‌های طیفی موجب بروز پدیده گسیس و تغییرات محتوای بسامدی می‌شود، لذا برای حذف این اثرات، در حدود ۱۰٪ همپوشانی میان پنجره‌های مجاور در نظر گرفته شد.
- به منظور تشخیص نوفه‌هایی از قبیل اثرات قدم پا، عبور ماشین و هر عاملی اینچنین، از روش معروف STA/LTA استفاده شد. با استفاده از این روش نوفه‌ها تشخیص داده شده و سپس از داخل داده حذف

پردازش مایکروترموها طراحی کرده است. قبل از شروع پردازش، ابتدا مقدار DC Offset ثبت شده روی هر سیگنال با متوسط‌گیری مقادیر دامنه ثبت شده، محاسبه و بنا بر مثبت یا منفی بودن مقدار آن، از روی سیگنال حذف شد. در برخی نگاشت‌ها به دلیل شرایط برداشت، DC موجود حالت غیرخطی و غیریکنواخت داشت که با تغییر و کوچک کردن بازه متوسط‌گیری دامنه و در حقیقت دینامیک کردن عمل متوسط‌گیری آنها نیز تا حد بسیار زیادی حذف شد. وجود DC عملیات یافتن نوفه‌های گذرا را با مشکل مواجه می‌کند. در نتیجه با نوشتن یک برنامه مبدل (converter) داده‌ها به فرمت مناسب برنامه تبدیل شد. روی داده‌ها، فیلتر باند گذری به منظور حذف اثرات ناشناخته اعمال شد که مشخصات فیلتر مربوطه برای هر سایت در جدول ۳ آمده است. سپس بررسی روی انتخاب پنجره‌های زمانی، به منظور پردازش طیفی صورت گرفت. پارامترهای زیر به منظور تعیین پنجره‌های مناسب زمانی مد نظر بوده است:

روش هندسی با پنجره‌های دیگر ترکیب (merge) شده است.

در شکل‌های ۲ تا ۳، نتایج نهایی حاصل از محاسبات فوق برای یکی از جایگاه‌ها (سد رسوبگیر، برداشت چهارم) آمده است. در شکل ۲ نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی (شرقی - غربی و شمالی - جنوبی) به عمودی و در شکل ۳ نتیجه حاصل از ترکیب منحنی‌های H/V دو مؤلفه افقی آمده است. برای هر محاسبه نتایج به صورت جدول ۲ خلاصه می‌شود.

در ادامه به منظور بررسی کیفیت نتایج حاصل و همچنین اطمینان یافتن از وارد نشدن نتایج نامناسب، اقدام به محاسبه نسبت و دامنه طیفی برای تک تک پنجره‌ها شده و اگر یک پنجره زمانی، دارای نتایج مناسبی نبود، از بین پنجره‌ها حذف می‌شد و پردازش به صورت مجزا برای پنجره‌های باقی‌مانده صورت می‌گرفت تا به بهترین جواب ممکن برسیم. برای نمونه در شکل ۴ پنجره‌ای به رنگ سرخ مشخص شد و محاسبات پیش‌گفته روی آن صورت گرفت. نسبت طیفی و دامنه طیفی این تک پنجره در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. اگر پنجره‌ای پایداری پاسخ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌داد آن پنجره حذف می‌شد و محاسبات مجدد به منظور کاهش خطا صورت می‌گرفت. خلاصه‌ای از نتایج هر جایگاه در جدول ۳ آمده است.

شده‌اند. برای متوسط‌گیری دامنه STA، بازه زمانی ۰/۵ ثانیه، برای LTA، بازه زمانی ۲۵ ثانیه و برای آستانه تحریک مقدار نسبت ۲ مد نظر قرار گرفته است.

در شکل ۱ نمونه‌ای از نگاشت‌های ثبت شده آمده است.

پس از انتخاب پنجره‌های زمانی، طیف فوریه هر پنجره محاسبه شده و در ادامه نسبت طیفی H/V محاسبه شد، این عمل برای تک تک پنجره‌های هر نگاشت صورت گرفته و در نهایت تمامی پنجره‌ها با هم ترکیب شده‌اند. در اینجا چند مسئله قابل ذکر است:

۱- جهت نرم کردن (smoothing) نتایج طیفی رهیافت‌های متفاوتی از قبیل نرم کردن خطی، مربعی یا هندسی وجود دارد که در این جا از دو روش خطی و یک نوع موسوم به نرم شدگی کونو و اوماچی (Konno and Ohmachi) استفاده شده است. این مدل از نرم کردن را که در مقایسه با انواع دیگر نتایج مناسب‌تری در برداشت، دو محقق به همین نام ارائه کردند (کونو و اوماچی ۱۹۹۸).

۲- به منظور tapering، یک تابع کسینوسی در نظر گرفته و روی طیف داده‌ها در کل مدت ثبت کردن اعمال شد.

۳- در نهایت نتایج حاصل از هر پنجره زمانی با استفاده از

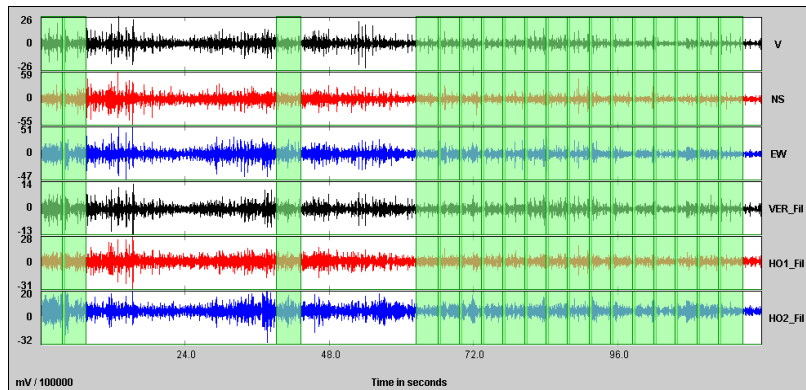
جدول ۲. نمونه‌ای از نتیجه به‌دست آمده برای هر محاسبه. در اینجا نام جایگاه، تعداد پنجره‌های انتخاب شده، طول پنجره‌ها، بسامد طبیعی به‌دست آمده، منها و به‌علاوه یک انحراف معیار استاندارد آمده است.

SITE NAME	n-windows	Window-len	Natural frequency(Hz)	-1 s.d(Hz)	+1 s.d(Hz)
SADE ROSOB GIR4	18	4.000s	10.8	10.1	11.6

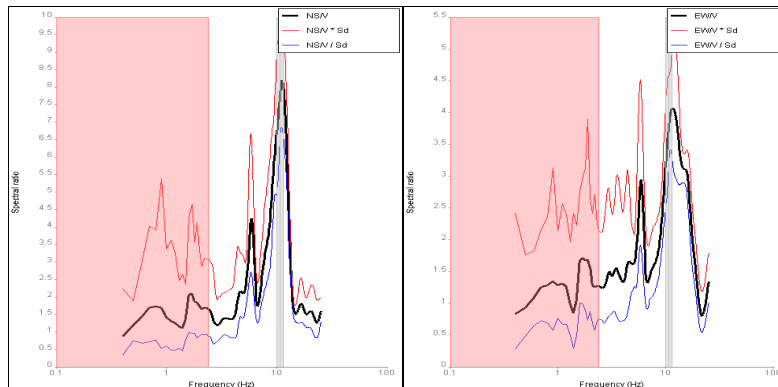
جدول ۳. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در هر جایگاه و در برداشت‌های متفاوت. ستون دوم بسامد طبیعی و ستون‌های سوم و چهارم مقدار بسامد طبیعی منها و به‌علاوه انحراف معیار استاندارد را نشان می‌دهند، همچنین ستون آخر نوار بسامدی فیلتر اعمال شده را ارائه می‌کند.

SITE NAME	$F_0$ [Hz]	-1 s.d [Hz]	+1 s.d [Hz]	Band-pass filter (Hz)
AHMAR1	0.95	0.9	1.0	0.5-25
AHMAR2	1.3	1.0	1.6	0.5-25
AHMAR3	1.1	1.0	1.2	0.5-25
HERASAT1	7.2	6.2	8.4	1-20
HERASAT2	7.8	6.7	9.1	1-20
HERASAT3	7.2	6.2	8.3	1-20
HERASAT4	1.3	1.1	1.5	1-20
MA'DAN1	4.8	4.2	5.4	1-15
MA'DAN2	2.3	1.9	2.7	1-15
MA'DAN4	5.5	4.7	6.4	1-15
MEYDOK1	1.1	1.0	1.2	0.5-15
MEYDOK2	0.9	0.8	1.0	0.5-15
MEYDOK3	1.0	0.9	1.2	0.5-15
MODIRIAT1	1.2	1.1	1.3	0.5-10
MODIRIAT2	0.7	0.6	0.9	0.5-10
MODIRIAT3	4.1	3.6	4.6	0.5-10
MODIRIAT4	1.8	1.6	2.0	0.5-10
ORKIDEH1	6.7	6.2	7.2	0.5-10
2ORKIDEH1	1.6	1.4	1.9	0.5-10
2ORKIDEH2	1.8	1.6	2.0	0.5-10
2ORKIDEH3	1.5	1.3	1.7	0.5-10
2ORKIDEH4	1.7	1.5	1.9	0.5-10
PARIZ1	1.4	1.1	1.8	1-12
PARIZ2	9.9	9.1	10.9	1-12
PARIZ3	9.6	8.1	11.4	1-12
RESTAURANT1	1.0	0.9	1.1	0.5-7
RESTAURANT2	1.2	1.1	1.3	0.5-7
RESTAURANT3	1.1	0.9	1.2	0.5-7
RESTAURANT4	1.0	0.8	1.2	0.5-7
SADE ROSOB GIR1	11.9	10.1	14.0	0.5-15
SADE ROSOB GIR2	10.8	9.8	11.8	0.5-15
SADE ROSOB GIR3	11.1	10.5	11.7	0.5-15
SADE ROSOB GIR4	10.8	10.1	11.6	0.5-15
SHAHRAK1	1.1	1.0	1.3	0.5-10
SHAHRAK2	8.7	7.1	10.7	0.5-10
SHAHRAK4	0.8	0.7	0.9	0.5-10
TAHGHIGH1	3.4	2.8	4.2	0.5-20
TAHGHIGH2	1.2	1.0	1.4	0.5-20
TAHGHIGH3	3.9	3.2	4.6	0.5-20
TAHGHIGH4	2.7	2.3	3.1	0.5-20
TA'MIRGAH1	3.9	3.3	4.5	1-12
TA'MIRGAH2	4.0	3.5	4.6	1-12
TA'MIRGAH3	5.2	4.6	5.9	1-12
TAMIRGAH4	4.1	3.4	5.0	1-12

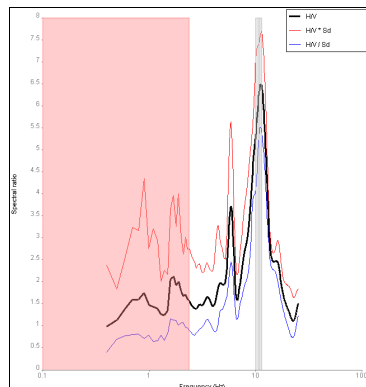




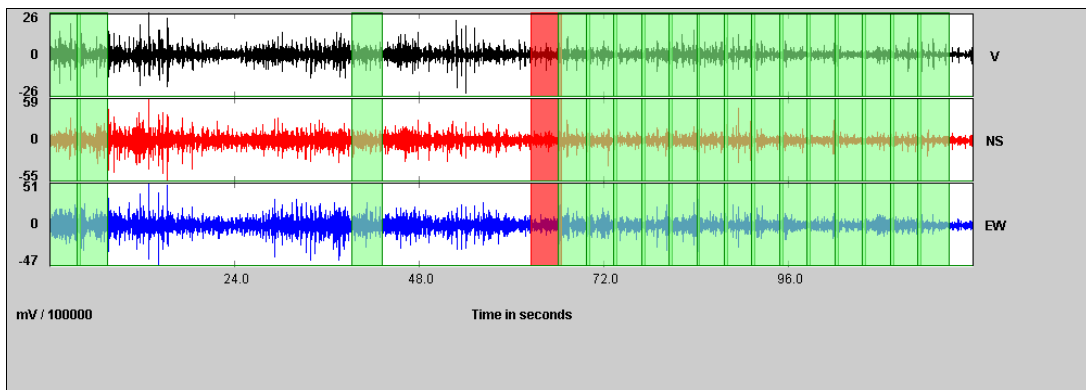
شکل ۱. نمونه‌ای از نگاشت‌های ثبت شده (سه مؤلفه بالایی) به همراه نگاشت‌های فیلتر شده (سه مؤلفه پایینی) و نمایش پنجره‌های زمانی انتخاب شده. (جایگاه سد رسوب‌گیر، تعداد ۱۸ پنجره با طول ۴ ثانیه).



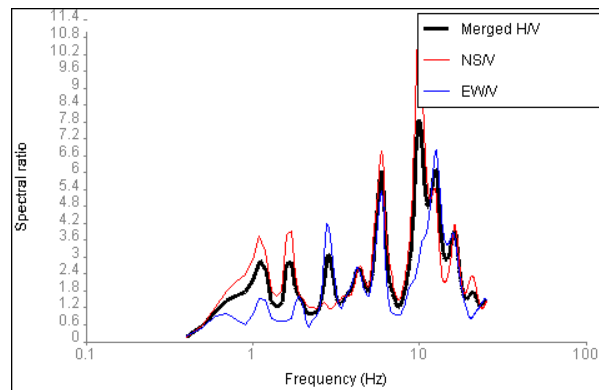
شکل ۲. نسبت طیفی مؤلفه افقی، شرق-غرب به عمودی (راست) و شمال-جنوب به عمودی (چپ) به همراه ضرب و تقسیم آنها در انحراف معیار استاندارد. میانه نوار خاکستری رنگ، محل بسامد طبیعی را نشان می‌دهد. منحنی ضخیم نتیجه اصلی و منحنی‌های بالا و پایین آن به ترتیب ضرب و تقسیم منحنی اصلی در انحراف معیار استاندارد هستند. نوار سرخ رنگ محدوده‌ای را نشان می‌دهد که به علت انحراف معیار استاندارد زیاد، امکان صحت پیک مشاهده شده در آن منطقه غیر منطقی است و اگر پیک در آن محدوده اتفاق بیفتد، جای تردید بسیار زیاد است (جایگاه سد رسوب‌گیر برداشت شماره چهارم).



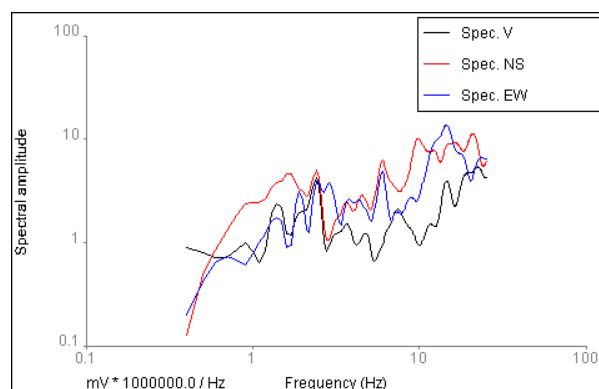
شکل ۳. نتیجه نهایی حاصل از ترکیب نسبت‌های طیفی برای دو مؤلفه شرق-غرب و شمال-جنوب به مؤلفه عمودی. منحنی ضخیم نتیجه به‌دست آمده و دو منحنی دیگر به ترتیب حاصل ضرب و تقسیم آن در انحراف معیار استاندارد است. نوار خاکستری محدوده بسامد طبیعی و باند نوار سرخ محدوده با انحراف معیار استاندارد زیاد است. (جایگاه سد رسوب‌گیر برداشت شماره چهارم).



شکل ۴. مؤلفه‌های نگاشت ثبت شده در جایگاه سد رسوب‌گیر به همراه پنجره‌های زمانی مربوط. در اینجا یک پنجره به صورت مجزا (سرخ رنگ) مشخص شده و برای آن تک پنجره، نسبت طیفی مؤلفه افقی به عمودی (H/V) و همچنین دامنه طیفی (به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶) محاسبه شده است.



شکل ۵. نسبت طیفی محاسبه شده برای تک پنجره سرخ رنگ در شکل ۴. مشاهده می‌شود که پیک موجود با پیک حاصل از ترکیب همه پنجره‌ها (شکل ۳) همخوانی دارد.



شکل ۶. دامنه طیفی محاسبه شده برای تک پنجره سرخ رنگ در شکل ۴. روشن است که در اطراف پیک بسامد (حدود ۱۰ هرتز) دامنه طیفی مقدار قابل قبولی را نشان می‌دهد.

## ۸ بحث

از این امر بود. هرچند امکان رسم کردن منحنی‌های پربندی برای بسامد و دامنه فراهم بود ولی از نظر علمی، با خطای زیادی همراه بود.

## ۹ مقایسه نتایج با مشاهدات میدانی موجود

خوشبختانه به همراه برداشت داده از جایگاه‌ها، گروه جداگانه‌ای به بررسی شرایط زمین‌شناسی منطقه پرداخته‌اند که در این بخش مقایسه‌ای بین برآوردهای به‌دست آمده در این تحقیق و گزارش‌های موجود صورت خواهد گرفت. بررسی موجود را پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در ۱۳۸۱ تهیه کرده است. گزارش موجود برای شرایط ساختگاهی در بررسی‌های میدانی و همچنین برآوردهای تحقیق حاضر، نشان از همسانی بسیار نزدیک محاسبات با مشاهدات دارند؛ به گونه‌ای که از بین ۱۲ جایگاه برداشت داده، فقط در یک جایگاه نتایج همخوانی ندارد و در بقیه موارد توافق بسیار زیادی موجود است. در جایگاه‌های احمر، مدیریت، میدوک و رستوران، رده ساختگاهی خاک نرم برآورد شد که به جز جایگاه میدوک که دارای ساختگاهی با آبرفت سخت است، مشاهدات، نتیجه دیگر جایگاه‌ها را تأیید می‌کند. همچنین در جایگاه‌های معدن، حراست، پاریز، سد و شهرک، این بررسی نشان از آبرفت سخت داشت که مشاهدات میدانی نیز همان را تأیید می‌کند. در جایگاه‌های ارکیده، تحقیقی و تعمیرگاه نیز، توافق خوبی حاکی از آبرفت نرم دیده می‌شود.

وجود جاده‌های پرتردد، خطوط راه آهن، کارخانه‌های بزرگ، معدن‌کاری و فعالیت‌های معدنی، رودخانه‌ها، آبشارها و بسیاری عوارض مشابه باعث ایجاد نوفه در محل معدن مس سرچشمه می‌شود. منحنی‌های پراکندگی امواج در بسیاری موارد تا حد زیادی وابسته به خصوصیات لایه اول خاک است. معمولاً اگر منبع‌های میکروترومور، طبیعی باشند بسامدهای کمی خواهند داشت و در حالت منبع‌های مصنوعی، بسامدها زیادتر خواهند بود. از آنجا که در زمان رفت و آمد و عملیات معدن‌کاری، سطح نوفه زمینه منطقه بالا می‌رفت، لذا داده‌ها در آرام‌ترین زمان ممکن در منطقه معدن برداشت شد. برای اطمینان از صحت نتایج، همه دامنه‌های طیفی مرتبط با بسامد طبیعی به‌دست آمده با جدول ۴ استانداردهای گروه SESAME مقایسه شد. این جدول حداقل‌های لازم برای دامنه‌های متناسب با محل رخداد بسامد طبیعی را نشان می‌دهد. نتایج این مقایسه در جدول ۶ آمده است. با استفاده از رده‌بندی ارائه شده (زارع و همکاران، ۱۹۹۹) برای خاک (جدول ۵)، از رده ساختگاهی و سرعت موج برشی بر اساس بسامد طبیعی محاسبه شد و مقادیر ارائه شده در جدول ۵ برآوردی صورت گرفت. سپس رده ساختگاهی برآورد شده با مشاهدات میدانی موجود مقایسه شد که نتایج آن نیز در جدول ۶ آمده است. متأسفانه برای سرعت موج برشی، مبنای مقایسه وجود نداشت. در جریان این تحقیق سعی بر ارائه ریز پهنه‌بندی منطقه با استفاده از بسامد طبیعی و دامنه تقویت بود که متأسفانه، کمبود نقاط برداشت، مانع

جدول ۴. مقادیر آستانه دامنه در محدوده بسامد طبیعی مشاهده شده. در عمل هر بسامدی را در حکم بسامد طبیعی نمی‌توان در نظر گرفت مگر اینکه در آن بسامد

دامنه طیفی، مقدار خاصی داشته باشد (WP12 SESAME project ...).

محدوده بسامدی (Hz)	<0.2	0.2-0.5	0.5-1	1-2	>2
مقدار آستانه دامنه پیک برای حالت قابل قبول	3	2.5	2	1.78	1.58

جدول ۵. دسته‌بندی ساختگاه برای ایران بر اساس باند بسامد طبیعی و سرعت موج برشی (زارع و همکاران، ۱۹۹۹).

متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول (m/s)	محدوده بسامد طبیعی	رده ساختگاه	
$V_s > 700$	$f > 15$	سنگی	۱
$500 < V_s < 700$	$5 < f < 15$	آبرفت سخت	۲
$300 < V_s < 500$	$2 < f < 5$	آبرفت نرم	۳
$V_s < 300$	$f < 2$	خاک نرم	۴

جدول ۶. نتایج نهایی به‌دست آمده برای هر جایگاه. (مشاهدات میدانی برای جایگاه حراست در دسترس نبود).

متوسط سرعت موج برشی (m/s)	انطباق با مشاهدات میدانی؟	نوع (راست) و رده (چپ) ساختگاه		دامنه طیفی، آستانه Sesame (راست)، مشاهده (چپ)		بسامد طبیعی	سایت
<۳۰۰	همخوانی مناسب	۴	خاک نرم	۱۵	۱/۷۸	۱/۲	احمر
۵۰۰-۷۰۰	داده‌ای موجود نبود	۲	آبرفت سخت	۲/۵	۱/۵۸	۷	حراست
۵۰۰-۷۰۰	همخوانی مناسب	۲	آبرفت سخت	۲	۱/۵۸	۵	معدن
<۳۰۰	خیر	۴	خاک نرم	۷	۱/۷۸	۱/۱	میدوک
<۳۰۰	همخوانی مناسب	۴	خاک نرم	۲/۵	۱/۷۸	۱-۲	مدیریت
۵۰۰-۷۰۰	همخوانی مناسب	۳	آبرفت نرم	۲/۵	۱/۷۸	۱/۵-۲	ارکیده
۵۰۰-۷۰۰	همخوانی مناسب	۲	آبرفت سخت	۱/۷	۱/۵۸	۱۰	پاریز
<۳۰۰	همخوانی مناسب	۴	خاک نرم	۲	۱/۷۸	۱-۱/۲	رستوران
۵۰۰-۷۰۰	همخوانی مناسب	۲	آبرفت سخت	۶/۵	۱/۵۸	۱۰-۱۱	سد
۵۰۰-۷۰۰	همخوانی مناسب	۲	آبرفت سخت	۲/۲	۱/۵۸	۸	شهرک
۳۰۰-۵۰۰	همخوانی مناسب	۳	آبرفت نرم	۱/۷	۱/۵۸	۲/۷-۳/۵	تحقیقی
۳۰۰-۵۰۰	همخوانی مناسب	۳	آبرفت نرم	۲/۵	۱/۵۸	۴-۵/۲	تعمیرگاه

## ۱۰ نتیجه‌گیری

پایداری نتایج بسیار اهمیت دارد. آنچنان که در طی متن مقاله ذکر شد در اینجا به هیچ عنوان از انتخاب پنجره زمانی به صورت ایستا (کاری که در بسیاری طرح‌های مشابه صورت می‌گیرد) استفاده نشد. منظور از ایستایی انتخاب برای مثال ۵ پنجره بیست ثانیه‌ای در طول هر نگاشت به صورت ثابت است. این مسئله سبب ورود پنجره‌هایی از سیگنال به محاسبات می‌شود که عملاً ارزش پردازشی ندارد و نتایج را ناپایدار می‌کند.

۳- مقادیر دامنه همه نتایج به‌دست آمده، به خوبی شرایط آستانه در استاندارد تعریف شده گروه طرح

۱- از بین برداشت‌هایی که به تکرار در یک نقطه صورت پذیرفته است، بسامد طبیعی به‌دست آمده یکنواختی قابل قبولی را نشان می‌دهد که به جز در مواردی اندک، بسامد طبیعی محاسبه شده، مستقل از زمان اندازه‌گیری بوده است. این مسئله تأییدی دوگانه بر امر برداشت و پردازش داده‌ها دارد. همچنین نشان می‌دهد که با برداشت و پردازش دقیق داده، مایکروترموورها نتایج پایداری از خود آشکار می‌سازند.

۲- متغیر و دینامیک بودن انتخاب پنجره‌های زمانی در

- Chavez-Garcia, F. J., Sanchez, L. R., and Hatzfeld, D., 1996, Topographic site effects and HVSR. A comparison between observations and theory: *B. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 5, 1559-1573.
- Fäh D., Rüttener E., Noack Th. and Kruspan P., 1997, Microzonation of the city of Basel, *J. Seismol.*, **1**, 87-102.
- Konno, K., and Ohmachi, T., 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *B. Seismol. Soc. Am.*, **88**, 228-241.
- Lermo, J., Rodriguez, M., and Singh, S. K., 1988, The Mexico earthquake of September 19, 1985-Natural Period of Sites in the Valley of Mexico from Microtremor Measurements and Strong Motion Data Earthquake Spectra, November 1988, Volume 4, Issue 4, pp. 805-814.
- Mete, M., and Dýkmen, Ü., 2003, Application of microtremors to seismic microzoning procedure: *J. Balkan Geophys. Soc.*, **6**, 143-156.
- Molnar, S., and Cassidy, J. F., 2006, A comparison of site response techniques using weak-motion earthquakes and microtremors. *Earthquake Spectra*, **22**, 169-188.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface: *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute, Tokyo*, **30**, 25-33.
- Omori, F., 1908, On microtremors, *Res. Imp. Earthq. Inv. Comm.*, **6**, 1-6.
- WP12 SESAME project, Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. SESAME European research project WP12-Deliverable D23.12 European Commission-Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm> deliverable D13.08.
- Zaré, M., Bard, P.-Y. and Ghafory-Ashtiany, M., 1999, Site categorization for the Iranian strong motion network, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **18**, 101-123.

SESAME را تأمین می‌کند. این مطلب حاکی از صحت نتایج است و همچنین تأثیر روند پردازش را بر نتایج نشان می‌دهد. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که پردازش غیر استاندارد بر نتایج حاصل از مایکروترمور به شدت تأثیر گذار است.

۴- انطباق نتایج با مشاهدات میدانی نشان و تأییدی بر قابلیت مایکروترمورها به عنوان ابزاری در برآورد کردن اثرات ساختمانی دارد.

۵- انتخاب یک مقدار درحکم بسامد طبیعی، فقط به این شرط نیست که پیک نسبت طیفی در آن بسامد رخ دهد، بلکه به دامنه پیک و همچنین میزان افت دامنه در دو طرف بسامد پیک وابسته است. این مسئله دقت و کیفیت پیک مشاهده شده را تأیید می‌کند.

۶- براساس مشابهت برآورد و مشاهده در رده ساختگاه می‌توان با استفاده از این نتایج، سرعت موج برشی را به صورت تقریبی (جدول ۶، ستون آخر) برآورد کرد. این مسئله در تعیین تقریبی سرعت موج برشی در یک منطقه با سرعت بسیار زیاد و هزینه بسیار پائین سودمند است.

#### منابع

مطالعات لرزه‌نگاری و زلزله‌شناسی در محدوده معدن و سد رسوب‌گیر مجتمع مس سرچشمه، گزارش نهایی، جلد اول، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱.

غلامی، و.، ۱۳۸۵، مطالعه مایکروترمورها براساس نگاهت‌های ثبت شده در معدن مس سرچشمه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Bard P.-Y., 1999, Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?. In: Irikurak, K, Kudok, K, Okadah, H and Sasatanit, T (eds) *The effects of surface geology on seismic motion*, pp 1251-1279. Balkema, Rotterdam.