

## بررسی پایداری منحنی طیفی H/V مایکروترمورها برای چند نمونه ساختگاه انتخابی در شهر تهران

فرناز کامران‌زاد

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
f\_kamranzad@ut.ac.ir

لاله خدنگی

دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
laleh.kh1990@gmail.com

حسین معاریان

استاد مهندسی زمین، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
memarian@ut.ac.ir

مهدی زارع

دانشیار زلزله‌شناسی مهندسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
mzare@iiees.ac.ir

مسعود مجرب

دکتر اکتشاف معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
mmojarab@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: پایداری مایکروترمورها، نویزهای لرزه‌ای محیطی، پاسخ لرزه‌ای ساختگاه، تهران

### چکیده

بررسی پاسخ ساختگاه یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در مطالعات زلزله‌شناسی و ژئوتکنیک لرزه‌ای است که به‌همراه شرایط زمین‌شناسی محلی، بخش مهمی از مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه را تشکیل می‌دهد. به‌منظور برآورد پارامترهای اساسی ساختگاه نظیر فرکانس غالب و ضریب بزرگ‌نمایی، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از رکوردهای شتاب‌نگاری رخداد زلزله‌های ثبت‌شده در محدوده مورد مطالعه، اجرای آزمایشات دقیق ژئوتکنیکی، مطالعات ژئوفیزیکی لرزه‌نگاری سطحی و درون‌چاهی و نیز اندازه‌گیری ارتعاشات (نویزهای) لرزه‌ای محیطی موسوم به روش مایکروترمورها وجود دارد که در میان روش‌های فوق، روش مایکروترمورها به دلیل سهولت در جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، هزینه کم، غیر تخریبی بودن و ارائه نتایج خوب و قابل اعتماد، بیش‌تر از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، به‌منظور بررسی پایداری زمانی نتایج طیف H/V مایکروترمورها در برآورد پاسخ ساختگاه‌های واقع در مکان‌های پرسرصد با منابع نویز محلی نظیر شهر تهران، ۶ ساختگاه نمونه در نقاط مختلف گستره این کلان‌شهر انتخاب و نویزهای محیطی در این نقاط ثبت و تجزیه و تحلیل شدند. شرایط ثبت امواج نظیر طول مدت رکوردگیری، تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری و تعداد تکرارها در محل هر ساختگاه با سایر ساختگاه‌ها متفاوت بوده است. پس از ثبت داده‌ها، پردازش و تفسیر اطلاعات براساس دستورالعمل پروژه تحقیقاتی SESAME اروپا صورت گرفت و منحنی‌های H/V نهایی برای هر ساختگاه به دست آمد. برای هر ساختگاه، میزان شباهت منحنی‌های H/V مربوط آن با محاسبه ضریب همبستگی بین دو به دو این منحنی‌ها و تولید ماتریس همبستگی مقایسه شد. سپس واریانس مقادیر همبستگی بدون در نظر گرفتن مقادیر خودهمبستگی در ماتریس (همبستگی با مقدار ۱) محاسبه شد. در نتیجه همبستگی بالا میان منحنی‌های مربوط به هر ساختگاه و مقدار کم واریانس نشان داد که در بازه‌های زمانی مختلف، پاسخ طیف H/V مایکروترمورها در ارزیابی پاسخ یک ساختگاه پایدار بوده و می‌تواند به‌عنوان یک روش مطمئن در مطالعات برآورد پاسخ ساختگاه در شهر تهران مورد استفاده قرار گیرد.



ارزیابی اثرات محلی ساختگاه یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه است که این اثرات ساختگاهی اغلب موجب تقویت جنبش زمین شده و پتانسیل خرابی یک زمین‌لرزه بزرگ را افزایش می‌دهد (Atakan, 2007). ارزیابی پاسخ محلی ساختگاه به کمک روش‌های تئوری و تجربی قابل بررسی است که در دهه‌های اخیر، روش‌های تجربی به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از اولین روش‌های تجربی شناخته‌شده در برآورد شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، روش نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (H/V) نویزهای لرزه‌ای محیطی است که برای اولین بار توسط Igarashi و Nogoshi (۱۹۷۰) مطرح و سپس توسط Nakamura (۱۹۸۹) بسط داده شد. نویزهای لرزه‌ای محیطی موسوم به مایکروتورمورها، ارتعاشات پرپود کوتاهی هستند که در اثر منابع نویز طبیعی نظیر اثرات ساحلی، بارگذاری جوی، برخورد باد به سازه‌ها و پوشش گیاهی یا منابع نویز شهری نظیر عبورمورور و ترافیک و کارکرد ماشین‌آلات صنعتی ایجاد می‌شوند (Molnar et al., 2007). با وجود آن‌که بحث‌هایی در مورد کارایی مایکروتورمورها در شرایط مختلف ساختگاهی و سطوح مختلف جنبش زمین وجود دارد، اما به‌طور گسترده‌ای برای تخمین پرپود غالب نهشته‌های خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ventura and Thibert, 2007). یکی از پرسش‌های مهم در این مطالعات این است که آیا به علت تغییرپذیری منابع ایجادکننده مایکروتورمورها طی زمان، می‌توان از این امواج برای به دست آوردن خصوصیات حرکات زمین استفاده کرد یا خیر (Ventura et al., 2004)؟

از این رو، قبل از پیاده‌سازی این روش برای تخمین پاسخ ساختگاه در یک مکان پر سروصدا نظیر شهر تهران، با طیف وسیعی از منابع نویزهای محلی، بررسی پایداری زمانی طیف H/V مایکروتورمورها حائز اهمیت است. در مطالعه حاضر سعی شده است تا به بررسی پایداری زمانی طیف H/V مایکروتورمورها در ارزیابی پاسخ ساختگاه در شهر تهران پرداخته شود. بدین جهت ابتدا داده‌های امواج مایکروتورمور در ۶ ساختگاه نمونه انتخابی در گستره تهران جمع‌آوری شد. سپس سری‌های زمانی ثبت‌شده براساس دستورالعمل پروژه تحقیقاتی SESAME اروپا (۲۰۰۴) پردازش و تفسیر شدند و در پایان به منظور مقایسه میزان شباهت منحنی‌های H/V حاصل برای هر ساختگاه، ماتریس همبستگی شامل درایه‌های ضریب همبستگی بین دو به دو منحنی‌ها و در نهایت واریانس مقادیر برای هر ماتریس محاسبه شده است.

## ۲- اثرات ساختگاهی و روش‌های مطالعه آن

ارزیابی پاسخ زمین یکی از رایج‌ترین و مهم‌ترین مسائلی است که در ژئوتکنیک لرزه‌ای مطرح است. تحلیل‌های پاسخ ساختگاه به‌منظور پیش‌بینی حرکات سطح زمین و تدوین طیف پاسخ طرح و با هدف تعیین تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی و ارزیابی خطرات روانگرایی و محاسبه نیروهای ناشی از زلزله، که می‌تواند سبب ناپایداری زمین و سازه‌های حائل شود، به‌کار می‌رود. در شرایط ایده‌آل در یک تحلیل کامل پاسخ زمین، مکانیزم گسیختگی در سرچشمه زلزله مدل شده و نحوه انتشار موج از میان لایه‌های زمین در بالای بستر سنگی و در زیر یک ساختگاه خاص تعیین و چگونگی اثر لایه خاک واقع بر بستر سنگی بر حرکات سطح زمین مشخص می‌شود. درحقیقت به‌دلیل آن‌که مکانیزم گسیختگی گسل بسیار پیچیده بوده و طبیعت انتقال انرژی بین منبع و ساختگاه بسیار نامشخص است، این روند برای کاربردهای معمول مهندسی عملی نیست. در عمل، روش‌های تجربی برپایه خصوصیات زلزله‌های ثبت‌شده جهت تدوین روابط تخمینی به‌کار می‌روند. در بیش‌تر موارد این روابط تخمینی به‌همراه تحلیل خطر زمین‌لرزه برای پیش‌بینی خصوصیات حرکت در بستر سنگی در ساختگاه به‌کار می‌روند. بنابراین مساله تحلیل پاسخ زمین درحقیقت به تعیین پاسخ توده خاک در برابر حرکت بستر سنگی زیر آن تبدیل خواهد شد. گرچه امواج زلزله از میان ده‌ها کیلومتر سنگ و غالباً کم‌تر از ۱۰۰ متر خاک عبور می‌کند، اما لایه خاک در تعیین خصوصیات حرکت سطح زمین نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند (Kramer, 1996). به‌منظور مطالعه اثر خاک و محاسبه پارامترهای اساسی ساختگاه، روش‌های مختلف تئوری و تجربی ارائه شده است. روش‌های تئوری شامل مدل‌سازی رفتار خاک به روش خطی، خطی معادل و غیرخطی در یک، دو و یا سه بعد است که بر مبنای استفاده از داده‌های آزمایشات دقیق ژئوتکنیکی، مطالعات ژئوفیزیکی لرزه‌نگاری سطحی و درون‌چاهی انجام می‌شود. روش‌های تجربی نیز شامل استفاده از رکوردهای جنبش نیرومند (شتاب‌نگاری) و یا جنبش ضعیف رخداد زلزله‌های ثبت‌شده در محدوده مورد مطالعه، و اجرای اندازه‌گیری ارتعاشات (نویزهای) لرزه‌ای محیطی موسوم به روش مایکروتورمورها می‌باشد.

## ۳- معرفی نویزهای لرزه‌ای محیطی (مایکروتورمور)

ارتعاشات (نویزهای) لرزه‌ای محیطی موسوم به مایکروتورمورها یا امواج خردلرزه‌ای عبارتند از لرزش‌های محیطی خفیف با پرپود کوتاه در حد میکرون که در اثر به‌دام افتادن در محیط بین خاک و سنگ بستر و به‌دلیل اختلاف امپدانس دچار تشدید می‌شوند (Nakamura, 1989). درواقع مایکروتورمورها به‌عنوان امواج خفیفی در نظر گرفته می‌شوند که از توده خاک مانند یک فیلتر عبور کرده و تحت تاثیر مشخصات آن فیلتر قرار می‌گیرند. در نتیجه می‌توانند معرف ویژگی‌های دینامیکی آن فیلتر (خاک) باشند.

### ۳-۱- منابع ایجادکننده میکروتورمورها

به‌طور کلی عوامل ایجادکننده میکروتورمورها به دو دسته منابع طبیعی و منابع انسانی تقسیم‌بندی می‌شود. منابع طبیعی، سیگنال‌های لرزه‌ای شامل جزر و مد، برخورد امواج آب به ساحل، امواج بلند آب در دریاها و آزاد به دلیل سامانه‌های طوفانی، تغییرات فشار هوا، بادهای شدید و یا ارتعاشات درختان و ساختمان‌های بلند ناشی از باد است. منابع انسانی نیز متعدد بوده و شامل ترافیک اتومبیل‌ها و عبور و مرور قطارها، ماشین‌آلات صنعتی، انفجار و بهره‌برداری از ذخایر زیرزمینی (مانند ذخایر هیدروکربن، معادن و آب گرم) است (Mannheim, 2010). به‌عنوان یک قاعده، میدان موج نویزهای لرزه‌ای در فرکانس‌های پایین (کم‌تر از ۰/۵ هرتز) غالباً شامل نویزهای با منشأ طبیعی، در فرکانس‌های بالا (بیش‌تر از ۵ هرتز) غالباً شامل نویزهای با منشأ انسانی و در محدوده فرکانسی بین این دو (۰/۵-۵ هرتز) شامل نویزهایی با هر دو منشأ است (Bonnefoy-Claudet et al., 2006). تفکیک دقیق هر دو بخش میدان موج توسط یک «فرکانس مرزی» امکان‌پذیر نبوده و به‌شدت وابسته به ساختگاه است؛ زیرا به‌میزان قابل توجهی تحت تاثیر منابع نویز غالب و شرایط زمین‌شناسی محلی می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که در یک محیط با خاک نرم مانند حوضه‌های رسوبی عمیق، نویزهای با منشأ انسانی می‌تواند بخش غالب میدان موج نویزهای لرزه‌ای را تا حد پایین ۱-۰/۵ هرتز تشکیل دهد (Groos and Ritter, 2009). اما در محیط‌های دارای سنگ سخت، غالب بودن نویزهای انسانی در فرکانس حدود ۱ هرتز و یا حتی در فرکانس‌های بالاتر به پایان می‌رسد (Bonnefoy-Claudet et al., 2006).

### ۳-۲- مزایا و معایب استفاده از میکروتورمورها

تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد ماهیت میکروتورمورها و همچنین قابلیت استفاده از آن‌ها در تخمین اثرات ساختگاهی صورت گرفته است و مزایا و معایبی برای آن ذکر شده است. منتقدان این روش معتقدند که برخلاف امواج زلزله، میکروتورمورها غالباً در سطح و به‌وسیله منابع مصنوعی یا طبیعی ایجاد می‌شوند؛ بنابراین مخلوطی از امواج سطحی و حجمی منکسر شده هستند و تمامی ضخامت ستون خاک را طی نمی‌کنند و نیز تغییرشکل‌های خاک در زلزله قابل‌مقایسه با تغییرشکل‌های ناشی از میکروتورمورها نیست. در نتیجه موجب می‌شود اثرات غیرخطی خاک دیده نشود؛ در صورتی که طی زمین‌لرزه و با افزایش تغییرشکل نسبی، اثرات غیرخطی خاک ظاهر می‌شود. ضمن آن‌که ممکن است پاسخ طیفی این امواج با جابه‌جا کردن ایستگاه‌های اندازه‌گیری در یک ساختگاه تغییر کند.

به علاوه مطالعات محققان مختلف از جمله King (1974), Celbi et al. (1987), Lermo et al. (1988), Sing and Gutierrez (1991) و نیز پروژه SESAME (2004) نشان می‌دهد که پیوند طبیعی روش نسبت طیفی میکروتورمورها با پیوند طبیعی حاصل از رخداد زلزله مطابقت خوبی دارد، اما ضریب تشدید برپایه بزرگای زلزله‌ها متفاوت بوده و به‌طور کلی میکروتورمورها ضرایب تشدید را کم برآورد می‌کنند. مهم‌ترین محاسن میکروتورمور شامل سهولت و سرعت در جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، مقرون به صرفه بودن، غیر تخریبی بودن و ارائه نتایج خوب و قابل‌اعتماد در صورت استفاده صحیح و محتاطانه است.

### ۳-۳- روش‌های استفاده از میکروتورمورها

مهم‌ترین روش‌های ارائه شده برای استفاده از میکروتورمورها در مطالعه اثرات ساختگاهی، شامل روش‌های تک‌ایستگاهی از جمله روش مقادیر طیفی، روش نقطه مرجع (Hs/Hr)، روش نسبت مولفه افقی به قائم (H/V) موسوم به روش ناکامورا و روش‌های آرایه‌ای از جمله روش خودهمبستگی فضایی (SPAC) و روش فرکانس-عدد موج (f-k) و روش میکروتورمور آنکساری (ReMi) می‌باشد. از میان روش‌های تجربی فوق، روش تک‌ایستگاهی H/V ناکامورا به دلیل دسترسی آسان و سرعت بالای برداشت و ارائه نتایج مناسب، به‌طور معمول بیش‌تر از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۴- اندازه‌گیری داده‌ها

اولین گام در مطالعه اثر ساختگاه به کمک میکروتورمورها، برداشت داده‌ها در ساختگاه مورد مطالعه است که کلیات اندازه‌گیری این امواج در روش نسبت طیفی H/V به‌طور خلاصه شامل مراحل زیر می‌باشد:

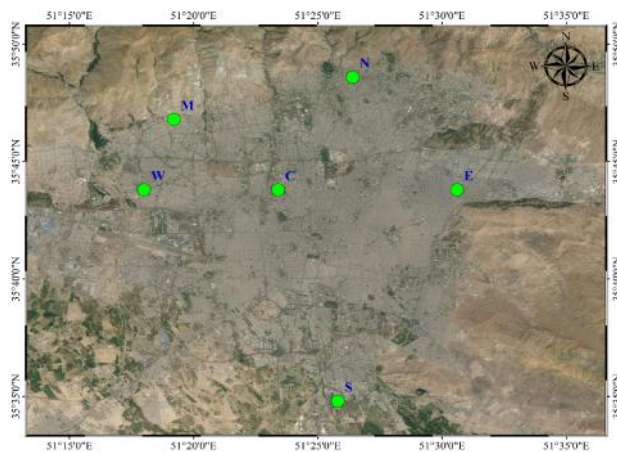
- انجام یک بازدید میدانی اولیه جهت بررسی وضعیت نویزهای احتمالی موجود در منطقه
- تعیین محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری
- جاگذاری و تراز کردن سنسور دستگاه لرزه‌نگار بر روی زمین محکم و مسطح مانند سنگ، آسفالت، سنگ‌فرش، موزاییک و خاک متراکم (خودداری از اندازه‌گیری بر روی زمین‌های نرم و شل مانند گل، باغچه، چمن، یخ و برف یا شن و ماسه دپو شده حتی با ضخامت کم)
- تنظیم جهت دستگاه در جهت شمال جغرافیایی برای ثبت صحیح شکل موج در سه مولفه E، N و V
- انتخاب Gain level در حداکثر مقدار دامنه ثبت موج برای جلوگیری از اشباع سیگنال



- انتخاب فرکانس نمونه برداری براساس فرکانس نایکوئیست مورد مطالعه برای جلوگیری از پدیده آلیازینگ
- اندازه گیری داده ها عموماً در ساعات خلوت مانند نیمه شب برای جلوگیری از ایجاد نویز و اخلاص و به حداقل رساندن اثر نویزهای محلی ناشناخته
- اجرای اندازه گیری ها حداقل به مدت حداقل ۳۰ دقیقه برای ثبت سیکل های کافی لرزه ای در هر نقطه
- ثبت و یادداشت هم زمان نویزهای گذرا و تصادفی احتمالی مانند عبور مترو، ترافیک شهری، کارکرد ماشین آلات
- ثبت مشخصات کامل نقاط برداشت شده از جمله مختصات ایستگاه های اندازه گیری میکروترمور توسط دستگاه GPS، ساعت دقیق برداشت، فاصله تا ساختمان های مجاور، نزدیکی به ایستگاه های مترو، شرایط خاص آب و هوایی و ...
- خودداری از انجام اندازه گیری در شرایط باران شدید یا وزش باد شدید

همان طور که در بخش ۳-۲ ذکر شد، باید توجه کرد یکی از مهم ترین معایب میکروترمورها تغییر طیف این امواج با تغییر محل اندازه گیری است. به این معنی که اگر اندازه گیری در یک ساختمان، در دو زمان مختلف و یا در دو ایستگاه که از هم خیلی دور نباشند انجام شود، ممکن است طیف دامنه ارتعاشات حاصل یکسان نباشد. برای اجتناب از این مشکل باید اندازه گیری ها به دفعات بیشتر و برای نقاط مختلف صورت گیرد. به علاوه مشکل دیگر آن، تغییر طیف میکروترمورها در طول شبانه روز است. ضمن آن که از اثرات شرایط جوی نیز نباید چشم پوشید. به همین منظور اندازه گیری ها در طول شبانه روز (اول یا آخر هفته) تکرار شده و هم چنین در موقعیت های زمانی مختلفی از سال انجام می شوند. به علاوه مطالعه نویز در شهر تهران به دلیل وجود حجم انبوهی از منابع تولید کننده ارتعاشات به صورت مصنوعی و طبیعی در طی شبانه روز کاری بس مشکل است. از این رو استفاده از میکروترمورها و نتیجه گیری بر مبنای خروجی آن ها، باید با رعایت دقت و احتیاط کامل صورت گیرد. بنابراین برای اجتناب از مشکل فوق، در این مطالعه، پایداری زمانی میکروترمورها در ۶ ساختمان نمونه انتخابی در شمال، جنوب، شرق، غرب و مرکز تهران (شکل ۱) بررسی شد تا میزان اعتبار پایداری نتایج میکروترمور در زمان های مختلف سنجیده شود. پارامترهای در نظر گرفته شده حین برداشت شامل مختصات ساختمان انتخابی، تاریخ و ساعت برداشت داده و تعداد و فاصله ایستگاه های موجود در هر ساختمان در جدول ۱ آورده شده است. باید دقت کرد که شرایط فوق برای این ۶ ایستگاه یکسان نبوده و برای هر یک به شرح زیر می باشد:

- کوتاه ترین بازه زمانی در نظر گرفته شده مربوط به ساختمان S واقع در حیاط سنگ فرش شده یک خانه واقع در جنوب تهران است که برای آن یک تک ایستگاه انتخاب و ثبت داده های میکروترمور به مدت ۳ ساعت متوالی از ۱۲ الی ۳ نیمه شب به صورت ۶ رکورد ۳۰ دقیقه ای انجام شد تا بررسی شود که آیا پاسخ میکروترمور در یک بازه زمانی کوتاه چند ساعته برای یک نقطه پایدار است یا رفتاری متغیر از خود نشان می دهد.
- سایت بعدی، ساختمان N واقع در حیاط سنگ فرش شده یک خانه در شمال تهران می باشد که برای این ساختمان نیز ثبت داده های میکروترمور به مدت ۳ ساعت متوالی از ۹ صبح الی ۱۲ ظهر یک روز تعطیل و در سه ایستگاه با فاصله ۵ متر از یک دیگر انجام شد؛ به طوری که در هر ایستگاه مدت ۳۰ دقیقه رکوردگیری اجرا و پس از یک بار ثبت داده در هر ایستگاه، مجدداً برای مرتبه دوم در هر سه ایستگاه برداشت اجرا شد. بنابراین ۶ رکورد ۳۰ دقیقه ای به دست آمد که هر ایستگاه دارای دو رکورد ۳۰ دقیقه ای غیرمتوالی با فاصله زمانی یک ساعته بوده است.
- ساختمان سوم، ساختمان W واقع در حیاط سنگ فرش شده یک خانه در غرب تهران می باشد که اندازه گیری میکروترمورها در آن مشابه اندازه گیری سایت N در شمال با این تفاوت که رکوردگیری در ساعت ۱۲ الی ۳ نیمه شب صورت گرفته است.
- ساختمان چهارم، سایت E واقع در حیاط سنگ فرش شده یک خانه در شرق تهران است که در این ساختمان نیز ابتدا ۳ ایستگاه به فاصله ۵ متر از یک دیگر انتخاب شدند. سپس با اندازه گیری میکروترمورها به مدت ۳۰ دقیقه در هر ایستگاه در دو روز غیرمتوالی (با ۴ روز اختلاف زمانی) و در ساعات مختلف ظهر (۱۳:۳۰-۱۴:۳۰) و صبح (۶:۳۰-۸)، به بررسی میزان پایداری زمانی میکروترمور و مکانی پرداخته شده است.
- ساختمان پنجم، ساختمان C واقع در محوطه دانشکده فنی دانشگاه تهران در مرکز تهران می باشد که در آن برداشت ها در دو روز غیرمتوالی (با اختلاف زمانی ۶ روز)، برای ۳ ایستگاه بر روی یک پروفیل شرقی-غربی با فاصله ایستگاهی ۹۰ متر از یک دیگر و در زمان های ۶:۳۰ و ۴:۳۰-۵:۳۰ صبح به مدت ۳۰ دقیقه برای هر ایستگاه انجام گرفت.
- و اما ششمین ساختمان یعنی ساختمان M واقع در محوطه دانشگاه آزاد علوم تحقیقات در شمال تهران دارای بیشترین تکرار بوده است؛ به طوری که برداشت میکروترمور در یک تک ایستگاه به مدت ۱۸ شب متوالی از ساعت ۲-۳ نیمه شب انجام شده است.



شکل ۱: موقعیت ۶ ساختمان مورد نظر جهت بررسی پایداری پاسخ میکروترمورها در شهر تهران

جدول ۱: فهرست ۶ ایستگاه برداشت جهت بررسی پایداری زمانی میکروترمورها

نام ایستگاه	تعداد ایستگاهها	فاصله ایستگاهها	مختصات جغرافیایی	تاریخ برداشت	ساعت برداشت
شمال تهران ۱ (N)	۳	۵	۵۱/۴۴ E و ۳۵/۸۱ N	۱۳۹۲/۸/۱۰	۹-۱۲ صبح
شمال تهران ۲ (M)	۱	-	۵۱/۳۲ E و ۳۵/۷۸ N	۱۳۹۲/۵/۱-۱۸	۲-۳ نیمه شب
جنوب تهران (S)	۱	-	۵۱/۴۳ E و ۳۵/۵۸ N	۱۳۹۲/۸/۱۲	۳-۱۲ نیمه شب
شرق تهران (E)	۳	۵	۵۱/۵۱ E و ۳۵/۷۳ N	۱۳۹۲/۸/۱۰ و ۶	۱۳-۱۴:۳۰ ظهر ۶:۳۰-۸ صبح
غرب تهران (W)	۳	۵	۵۱/۳۰ E و ۳۵/۷۳ N	۱۳۹۲/۸/۲	۳-۱۲ نیمه شب
مرکز تهران (C)	۳	۹۰	۵۱/۳۹ E و ۳۵/۷۳ N	۱۳۹۲/۷/۲۸ و ۲۲	۶-۷:۳۰ صبح ۴-۵:۳۰ صبح

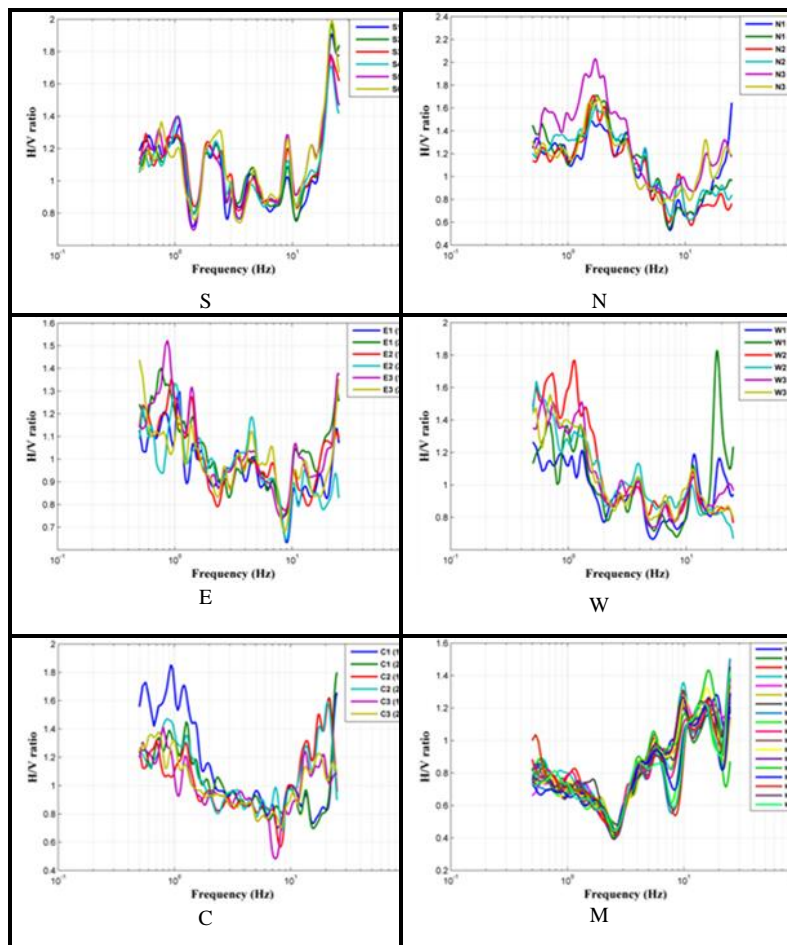
## ۵- پردازش داده‌ها

در تمامی برداشت‌های انجام شده، هدف بررسی این مساله است که آیا پاسخ روش میکروترمورها برای یک ساختمان مجزا در طی شرایط زمانی مختلف، ثابت و پایدار می‌باشد یا خیر؟ بدین ترتیب پس از جمع‌آوری داده‌ها، طبق آن چه در بخش قبل ذکر شد، اطلاعات براساس دستورالعمل پروژه SESAME اروپا پردازش شد. به طور معمول پردازش داده‌ها در نرم‌افزارهای پردازش سیگنال مربوط به مطالعات میکروترمورها از جمله Geopsy و J-SESAME به منظور انجام عملیات محاسباتی و تهیه طیف‌های خروجی صورت می‌گیرد که مراحل کلی مختلف پردازش و تفسیر داده‌های میکروترمورها به روش ناکامورا را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ادغام سری‌های زمانی ثبت شده میکروترمورها در سه مولفه شمالی- جنوبی (N)، شرقی- غربی (E) و قائم (Z) رکورد شده با یکدیگر در یک فایل برای ورود به نرم‌افزار
- تصحیح خط مبنا (DC Offset removal) به روش  $r_{min}$  برای حذف روند احتمالی از داده‌ها
- انتخاب قسمت‌های مانا (stable) سیگنال توسط پنجره‌های زمانی اتوماتیک و دستی به منظور حصول عدم وابستگی فرکانس به زمان. بنابراین بخشی از طول رکورد ارتعاشات را که مانا بوده و در آن نویزهای گذرا مانند عبور و مرور افراد و وسایل نقلیه وجود نداشته باشد و نیز دامنه سیگنال دچار اشباع شدگی نشده باشد، با کمک پنجره‌های زمانی اتوماتیک براساس روش نسبت  $sta/Ita$  یا به صورت دستی با میزان ۱۰٪ همپوشانی از کل رکورد جدا می‌شود.
- استفاده از فیلترهای دیجیتال مناسب برای جداسازی فرکانس‌های مطلوب که برای مطالعات شهری معمولاً بین ۰/۵ تا ۲۵ هرتز است. برای این منظور از یک فیلتر میان‌گذر استفاده شد و برای جلوگیری از قطع ناگهانی سیگنال و بروز پدیده گیس، سیگنال به‌طور نرم قطع شد. قابل ذکر است که از میان انواع مختلف Taperهای موجود، برای جداسازی و فیلتر کردن داده‌های میکروترمورها، به‌طور معمول فیلتر نوع Hanning پیشنهاد می‌شود (SESAME, 2004).
- محاسبه طیف دامنه فوری رکوردهای انتخاب شده با استفاده از الگوریتم تبدیل فوری به سریع (FFT)
- هموار کردن منحنی طیف رکوردهای جدا شده با استفاده از روش مناسب مانند Kanno and Ohmachi



- میانگین‌گیری بین ۲ مولفه افقی NS و EW براساس یکی از روش‌های میانگین حسابی، میانگین هندسی، میانگین درجه دوم و یا روش ترکیبی مختلط که معمولاً در مطالعات مختلف استفاده از روش میانگین هندسی یا روش درجه دوم توصیه می‌شود.
  - تهیه طیف نسبت میانگین مولفه‌های افقی به قائم H/V برای تمامی ایستگاه‌های نصب شده بر روی رسوبات.
  - تحلیل منحنی‌های طیفی H/V و استخراج دو پارامتر فرکانس (پریود) طبیعی و ضریب تشدید رسوبات در تمامی نقاط براساس پیک‌های موجود در طیف.
- پس از انجام مراحل پردازش فوق برای تمامی اندازه‌گیری‌ها، طیف نسبی H/V برای هر یک از این ۶ بازه زمانی رسم گردید (شکل ۲). سپس برای سنجش میزان شباهت در روند منحنی‌های مربوط به هر ساختمان مجزا، ابتدا همبستگی بین دو به دو منحنی‌های آن محاسبه و ماتریس همبستگی با درایه‌های شامل مقادیر همبستگی به دست آمد. پس از تعیین این مقادیر، واریانس بین مقادیر همبستگی (بدون در نظر گرفتن درایه خودهمبستگی با مقدار ۱) محاسبه شد (جداول ۲ تا ۷).



شکل ۲: منحنی‌های H/V به دست آمده برای ۶ ساختمان انتخابی در شهر تهران

جدول ۳: ماتریس همبستگی H/V ساختمان (N)

	$N_1(1)$	$N_1(2)$	$N_2(1)$	$N_2(2)$	$N_3(1)$	$N_3(2)$
$N_1(1)$	۱					
$N_1(2)$	۰/۷۸۱	۱				
$N_2(1)$	۰/۵۴۲	۰/۸۸۰	۱			
$N_2(2)$	۰/۶۰۸	۰/۹۱۶	۰/۹۶۵	۱		
$N_3(1)$	۰/۷۵۹	۰/۸۳۵	۰/۷۰۸	۰/۷۶۱	۱	
$N_3(2)$	۰/۷۲۷	۰/۶۹۸	۰/۵۰۴	۰/۵۸۹	۰/۹۰۷	۱

واریانس همبستگی = ۰/۰۲

جدول ۴: ماتریس همبستگی H/V ساختمان (S)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
S1	۱					
S2	۰/۹۹۷	۱				
S3	۰/۹۸۷	۰/۹۸۹	۱			
S4	۰/۹۷۲	۰/۹۷۳	۰/۹۸۴	۱		
S5	۰/۹۴۳	۰/۹۴۴	۰/۹۵۸	۰/۹۸۲	۱	
S6	۰/۹۷۱	۰/۹۷۵	۰/۹۷۹	۰/۹۸۲	۰/۹۷۸	۱

واریانس همبستگی = ۰/۰۰۰۲۳



جدول ۵: ماتریس همبستگی H/V ساختگاه (E)

	E <sub>1</sub> (1)	E <sub>1</sub> (2)	E <sub>2</sub> (1)	E <sub>2</sub> (2)	E <sub>3</sub> (1)	E <sub>3</sub> (2)
E <sub>1</sub> (1)	۱					
E <sub>1</sub> (2)	۰/۷۳۸	۱				
E <sub>2</sub> (1)	۰/۷۰۷	۰/۷۶۱	۱			
E <sub>2</sub> (2)	۰/۶۵۵	۰/۳۷۷	۰/۲۹۹	۱		
E <sub>3</sub> (1)	۰/۸۰۵	۰/۹۲۰	۰/۷۶۶	۰/۳۹۲	۱	
E <sub>3</sub> (2)	۰/۸۳۴	۰/۷۵۴	۰/۶۳۴	۰/۵۸۶	۰/۸۴۱	۱

واریانس همبستگی = ۰/۳۹

جدول ۴: ماتریس همبستگی H/V ساختگاه (W)

	W <sub>1</sub> (1)	W <sub>1</sub> (2)	W <sub>2</sub> (1)	W <sub>2</sub> (2)	W <sub>3</sub> (1)	W <sub>3</sub> (2)
W <sub>1</sub> (1)	۱					
W <sub>1</sub> (2)	۰/۷۲۷	۱				
W <sub>2</sub> (1)	۰/۳۸۰	۰/۰۴۵	۱			
W <sub>2</sub> (2)	۰/۱۳۵	-۰/۱۲۶	۰/۸۵۸	۱		
W <sub>3</sub> (1)	۰/۶۸۸	۰/۳۷۱	۰/۸۰۷	۰/۵۷۱	۱	
W <sub>3</sub> (2)	۰/۴۱۵	۰/۲۳۶	۰/۹۳۱	۰/۸۳۶	۰/۸۰۲	۱

واریانس همبستگی = ۰/۱۲

جدول ۶: ماتریس همبستگی H/V ساختگاه (E)

	C <sub>1</sub> (1)	C <sub>1</sub> (2)	C <sub>2</sub> (1)	C <sub>2</sub> (2)	C <sub>3</sub> (1)	C <sub>3</sub> (2)
C <sub>1</sub> (1)	۱					
C <sub>1</sub> (2)	۰/۹۳۳	۱				
C <sub>2</sub> (1)	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۱			
C <sub>2</sub> (2)	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۱	۰/۹۵۰	۱		
C <sub>3</sub> (1)	۰/۲۲۶	۰/۱۶۱	۰/۷۶۷	۰/۷۰۷	۱	
C <sub>3</sub> (2)	۰/۳۰۸	۰/۲۵۵	۰/۸۲۷	۰/۷۷۰	۰/۸۸۰	۱

واریانس همبستگی = ۰/۱۴

جدول ۷: ماتریس همبستگی بین منحنی‌های H/V ساختگاه شمال تهران (M)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
M1	۱																	
M2	۰/۹۶	۱																
M3	۰/۹۰	۰/۹۵	۱															
M4	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۶	۱														
M5	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۶	۱													
M6	۰/۸۶	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۸۷	۱												
M7	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۶	۱											
M8	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۶۷	۰/۷۴	۱										
M9	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۹۷	۱									
M10	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۱	۱								
M11	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۸۱	۰/۹۲	۱							
M12	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹۶	۱						
M13	۰/۹۲	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۴	۱					
M14	۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۶۷	۱				
M15	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۷۴	۱			
M16	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۶۰	۰/۹۳	۱		
M17	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۰	۰/۷۶	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۸۱	۰/۵۰	۰/۹۲	۰/۹۸	۱	
M18	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۷۶	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۵۴	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۹	۱

واریانس همبستگی = ۰/۱۳

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور بررسی پایداری منحنی طیفی H/V حاصل از اندازه‌گیری مایکروترومورها در مطالعات برآورد پاسخ ساختگاه، ابتدا ۶ ساختگاه انتخابی در گستره شهر تهران تعیین و امواج مایکروترومور در بازه‌های زمانی مختلف در هریک از این نقاط ثبت شد. سپس با پردازش و تفسیر اطلاعات به‌دست آمده، منحنی طیفی H/V رسم و ماتریس همبستگی و واریانس بین درایه‌های آن برای هریک از ساختگاه‌ها به‌طور

جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان داد که منحنی‌های H/V برای هر ساختمان، غالباً ضریب همبستگی بالایی با یکدیگر دارند و بنابراین مقدار واریانس همبستگی میان آن‌ها مقدار کمی به دست آمده است. پایین بود واریانس مقادیر همبستگی حاکی از آن است که تغییرات زمانی میکروترومور با وجود تنوع بازه‌های زمانی و تعداد ایستگاه‌ها برای یک ساختمان، بسیار کم است و پاسخ روش H/V تغییرات زمانی قابل توجهی ندارد؛ بنابراین نتایج طیف H/V برای هر ساختمان پایدار در زمان می‌باشد.

به علاوه نتایج نشان داد که برای ساختمان موجود در مرکز تهران (C)، پاسخ طیف H/V برای مجموع ۶ اندازه‌گیری صورت گرفته در ۳ ایستگاه واقع بر یک پروفیل شرقی-غربی با فاصله ایستگاهی ۹۰ متر، دارای ۲ روند است. به طوری که تا فرکانس حدوداً ۱۰ هرتز روند نمودارها بریک دیگر منطبق بوده، اما در فرکانس‌های بالاتر برای هر ایستگاه این روند تغییر کرده و به همین دلیل مقدار همبستگی ایستگاه‌های دور از هم کاهش می‌یابد. اما روند ۲ منحنی مربوط به هر ایستگاه جداگانه، هم‌چنان ثابت است. نتیجه فوق نشان می‌دهد که با افزایش فاصله ایستگاه‌های اندازه‌گیری در یک ساختمان، پاسخ طیف H/V ممکن است تغییر کند، که این مساله موید محلی بودن اثر خاک در هر ساختمان است. به طوری که برای ساختمان‌های E، N و W با فاصله ایستگاهی ۵ متر، پاسخ طیف H/V مربوط به ۳ ایستگاه موجود در هر ساختمان، تقریباً یکسان است ولی با افزایش فاصله ایستگاه‌ها در ساختمان C به مقدار ۹۰ متر، پاسخ H/V نیز تغییر می‌کند. اما به هر حال تکرار اندازه‌گیری برای هر ایستگاه واقع در ساختمان مورد مطالعه در زمان‌های مختلف، پاسخ یکسانی را ارائه می‌دهد.

## ۷- مراجع

Atakan K (2007) The need for standardized approach for estimating the local site effects based on ambient noise recordings, *Proceeding of the NATO advanced research workshop on increasing seismic safety by combining engineering technologies and seismological data*, Dubrovnik, Croatia, pp. 3-16

Bonnefoy-Claudet S, Cotton F and Bard P-Y (2006) The nature of noise wave field and its applications for site effects studies: A literature review, *Earth-Sci. Rev.*, 79, pp. 205-227

Groos JC and Ritter JRR (2009) Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment, *Geophysical Journal International*, 179, pp. 1213- 1231

SESAME (2004) Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, SESAME European research project, WP12 – Deliverable D23.1

Kramer SL (1996) Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, 653 pages, ISBN-13: 978-0133749434

Mannheim (2010) Broadband seismic noise: classification and Green's function estimation, PhD thesis in natural sciences, Karlsruhe Institute of Technology, 155 pages

Molnar S, Cassidy JF, Monahan PA, Onur T, Ventura C and Rosenberger A (2007) Earthquake site response studies using micro tremor measurements in southwestern British Columbia, *Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 410-419

Nogoshi M and Igarashi T (1970) On the amplitude characteristic of micro tremor, *Journal of seismological society of Japan*, 24, pp. 264-280

Nakamura Y (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1, pp.25-33

Ventura CE, Onur T and Hao KXS (2004) Site period estimations in the Fraser river delta using microtremor measurements- experimental and analytical studies, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1075

Ventura C and Thibert K (2007) Analysis of micro tremor measurements by the frequency domain decomposition method, *Proc. 2nd International Operational Modal Analysis Conference – IOMAC*, Copenhagen, Denmark

