

تعیین فرکانس غالب و طبقه‌بندی ساختگاه در تعدادی از ایستگاه‌های شتابنگاری شمال غرب ایران با استفاده از اندازه‌گیری میکروتیرمورها

عبدالحسین فلاحی^۱، مقداد سمائی^۲ و جعفر کارشی^۳

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

آپژوهشگر، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گنبد، گنبد، ژاپن

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

چکیده

در این مطالعه با استفاده از اندازه‌گیری میکروتیرمورها در ۱۵ ایستگاه شتابنگاری در شمال غرب کشور، فرکانس غالب تعیین و بر اساس آن طبقه‌بندی ساختگاه انجام شده است. برای این منظور اندازه‌گیری‌ها به مدت ۲۰ شبانه روز انجام گرفتند. پس از تصحیح داده‌های خام، نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم محاسبه و فرکانس مناظر با دامنه حداکثر به عنوان فرکانس غالب ساختگاه لحاظ شد. همچنین در ۱۱ ایستگاه با کیفیت مناسب میکروتیرمورها، نسبت‌های طیفی میکروتیرمورها و رکوردهای زمین‌لرزه ثبت شده در ایستگاه‌های شتابنگاری مقایسه شده‌اند. انطباق این دو نسبت طیفی رضایت بخش ارزیابی می‌شود. بر اساس تحلیل میکروتیرمورها، حداقل و حداکثر فرکانس به ازای ساختگاه‌های مختلف به ترتیب برابر با ۱/۷۲ و ۷/۳۴ هرتز به دست آمده‌اند. در این مطالعه همچنین با استفاده از مطالعات گذشته، سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی تعیین و به کمک آیین‌نامه‌های مختلف، نوع خاک ساختگاه‌ها طبقه‌بندی شده‌اند. با مقایسه تقسیم‌بندی بر اساس فرکانس غالب ساختگاه و تقسیم‌بندی بر اساس سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی گزارش شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، اختلافات قابل توجهی مشاهده می‌شود. این اختلاف می‌تواند ناشی از عدم قطعیت در سرعت موج برشی گزارش شده و هم در فرکانس غالب تعیین شده باشد.

کلیدواژه‌ها: میکروتیرمورها، ایستگاه شتابنگاری، فرکانس غالب، دوره تناوب طبیعی، HVSR-E، HVSR-M، طبقه‌بندی ساختگاه.

E-mail: meghdad.samaei@gmail.com

*نویسنده مسئول: مقداد سمائی

۱- پیش‌نوشتار

حالی که دامنه حداکثر نسبت طیفی در این روش معمولاً کمتر از روش SSR است (Lermo and Chavez-Garcia, 1994; Horike et al., 2001; Lachet et al., 1996; Bard et al., 2004; Field and Jacob, 1995; Lachet and Bard, 1994). در حالت کلی می‌توان گفت که فرکانس غالب به دست آمده از میکروتیرمورها معمولاً برای خاک‌های نرم دارای دقت قابل قبولی است، بنابراین این احتمال وجود دارد که در ساختگاه‌های با خاک سخت، پیکی مشاهده نشود (Molnar and Cassidy, 2006). ایده استفاده از میکروتیرمورها برای تعیین مشخصات ساختگاه، برای اولین بار، توسط Kanai and Tanaka (1961) ارائه شد. آنها بیان کردند که فرکانس غالب به دست آمده از طیف مؤلفه افقی میکروتیرمورها می‌تواند منعکس‌کننده ویژگی زمین‌شناسی لایه‌های سطحی باشد. بعضی از محققین مشخصات ساختگاه حاصل شده به کمک میکروتیرمورها از جمله دوره تناوب طبیعی (Ohta et al., 1978)، دامنه طیف مؤلفه افقی در لایه‌های رسوبی عمیق (Kagamai et al., 1982) و دامنه نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی در دو ساختگاه مختلف (Seo and Samano, 1992) را تأیید کرده‌اند. Nakamura (1989) روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (HVSR-M) را پیشنهاد داد. در این روش فرض شده است که میکروتیرمورها از امواج برشی (S) تشکیل شده‌اند و شامل امواج سطحی نیستند. Konno and Ohmachi (1998) و Wakamatsu and Yasui (1995) فاکتورهای بزرگنمایی ساختگاه به کمک روش‌های تئوری، نتایج به دست آمده از مدل Nakamura (1989) را برای نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم میکروتیرمورهای با دامنه کوتاه تأیید کردند. اما Horike (1985) و Okada et al. (1990) بر اساس اندازه‌گیری آرایه‌ای میکروتیرمورها، نشان دادند که مؤلفه افقی آنها عموماً از امواج رایلی تشکیل شده است. همچنین Tokimatsu and Miyadera (1992) و Tokimatsu et al. (1994) نشان دادند که HVSRs برای پرودهای کوتاه میکروتیرمورها با HVSR-M حاصل شده از روش‌های تئوری برای امواج رایلی مطابقت دارد (Satoh et al., 2001).

پاسخ ساختگاه - که شامل اثر لایه‌های بالایی خاک قرار گرفته بر روی سنگ بستر در زیر ایستگاه ثبت حرکت زمین است - یکی از پارامترهایی است که حرکت نیرومند زمین را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. لایه نرم بالایی خاک باعث افزایش مدت تداوم و دامنه حرکت در یک باند فرکانسی محدود می‌شود، این محدوده می‌تواند متناسب با ضخامت لایه خاک، خواص فیزیکی و هندسه ساختگاه تغییر کند (Hays, 1986). با توجه به اینکه طیف دامنه حرکت زمین دربرگیرنده اثرات چشمه زمین‌لرزه، انتشار امواج لرزه‌ای آزاد شده از چشمه به سمت ساختگاه، دستگاه ثبت‌کننده و پاسخ ساختگاه است، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تعیین پاسخ ساختگاه، حذف اثرات چشمه و مسیر ترکیب شده در طیف است، بنابراین استفاده از روش‌های نسبت طیفی این امر را ممکن می‌سازد (Molnar and Cassidy, 2006) که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: روش نسبت طیفی استاندارد (SSR) (Borcherdt, 1970)، نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم حرکت زمین ثبت شده (HVSR-E) و نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم میکروتیرمورها (HVSR-M) (Nakamura, 1989). در روش SSR باید طیف به دست آمده از حرکت ثبت شده بر روی زمین بر طیف همان حرکت بر روی سنگ بستر تقسیم شود، با توجه به اینکه این گونه رکوردها فراوان نیستند، کاربرد این روش دارای محدودیت است. از روش HVSR-E نیز زمانی می‌توان استفاده کرد که به اندازه کافی رکوردهای زمین‌لرزه با کیفیت بالا در یک ایستگاه موجود باشد که بتوان پاسخ ساختگاه را نتیجه گرفت. از محدودیت‌های این روش نیز این است که تنها می‌توان از آن در محل ایستگاه‌های لرزه‌نگاری استفاده کرد. استفاده از میکروتیرمورها برای برآورد پاسخ ساختگاه که در این مطالعه از آن بهره برده شده، روشی ساده و در عین حال کارآمد است که محدودیت‌های ذکر شده برای دو روش قبل را ندارد. دامنه حداکثر نسبت طیفی متناسب با فرکانس غالب به دست آمده از روش HVSR-E معمولاً از دامنه حاصل شده از روش SSR کوچک‌تر است. همچنین می‌توان برای خاک‌های نرم، فرکانس مناظر با پیک واضح مشاهده شده در نسبت طیفی را به عنوان فرکانس غالب ساختگاه پذیرفت، در

۲. روش‌های تحلیل میکروتیرمورها

در طول رکورد افزایش می‌یابد، بنابراین تحلیل داده‌ها به تعداد پنجره‌ها تکرار می‌شود و انحراف معیار نهایی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش طول پنجره مقادیر انحراف معیار نیز افزایش پیدا می‌کند چرا که داده‌های بیشتری با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت در آن پنجره حضور خواهند داشت. اما باید توجه کرد که نباید طول پنجره را برای کاهش انحراف معیار به مقدار زیادی کوتاه کرد، زیرا ممکن است نتواند فرکانس غالب ساختمان را به خوبی نمایان سازد. بنابراین می‌توان گفت که طول پنجره ارتباط مستقیم با وضوح فرکانس مورد نیاز دارد. یعنی باید با توجه به کاربرد این داده‌ها و اینکه فرکانس‌های مورد نظر در چه محدوده‌ای قرار دارند، طول پنجره تعیین شود.

۴- اندازه‌گیری میکروتیرمورها در ایستگاه‌های شتابنگاری شمال غرب ایران

در این مطالعه اندازه‌گیری میکروتیرمورها در تیر ماه ۱۳۹۴ به مدت ۲۰ شبانه روز در ۱۵ ایستگاه شتابنگاری وابسته به سازمان تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) واقع در شمال غرب ایران و در استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار GPL-6A3P (Akashi co. Ltd) مجهز به لرزه‌سنج‌هایی با سه مؤلفه عمود برهم (دو مؤلفه افقی و یک مؤلفه قائم) صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت برداشت ریزلرزه‌ها با فاصله نمونه‌برداری متفاوت و بازه زمانی دلخواه را دارد. دامنه شتاب میکروتیرمورها با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز و فیلتر بالاگذر ۰/۱ هرتز اندازه‌گیری شد.

به منظور کاهش اثرات نوفه‌های محلی از جمله ترافیک و وسایل نقلیه، ماشین‌آلات صنعتی و ...، اندازه‌گیری‌ها در محیط‌های شهری از نیمه شب تا اوایل صبح و در محیط‌های روستایی به دلیل پایین بودن سطح نویز و دسترسی مشکل، در طول روز صورت پذیرفت. طول رکوردها با توجه به میزان نوفه‌های موجود در محل از ۱۰ تا ۴۰ دقیقه متغیر بودند. همچنین با توجه به اینکه تحلیل اولیه داده‌های ثبت شده، در محل انجام می‌گرفت، اندازه‌گیری‌ها تا رسیدن به نتیجه مناسب تکرار می‌شد. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات کامل ایستگاه‌ها و رکوردهای اندازه‌گیری شده و میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی خاک ارائه شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) آمده است. همچنین در جدول مذکور، با توجه به سرعت موج برشی ذکر شده و بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳) ایران، یک نوع زمین به هر ساختمان اختصاص داده شده است.

۵- تحلیل داده‌های میکروتیرمورها

در این مطالعه برای محاسبه اثرات ساختمان از روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (HVSr-M) استفاده شده است. برای این منظور نرم‌افزار JSESAME (European Commission, 2004) به کار گرفته شد. برای رکوردهای میکروتیرمورها، پنجره‌هایی به طول ۱۵ و ۲۰ ثانیه با همپوشانی ۱۰ درصد انتخاب شد که داده‌ها در آن حالت مانا دارند و محاسبات بر اساس این پنجره‌ها انجام شد. در انتخاب پنجره، هدف نگاه داشتن ماناترین بخش‌های داده و اجتناب از پدیده‌های گذرا با منابع خاص مانند عابرین پیاده، ترافیک و ... است (Atakan et al., 2004). در این نرم‌افزار، الگوریتمی نوشته شده است که سعی می‌کند تغییرات گذرا را پیدا کند و از آنها اجتناب ورزد. روند یافتن تغییرات گذرا بر پایه مقایسه بین میانگین کوتاه‌مدت (STA) با میانگین بلندمدت (LTA) است. میانگین کوتاه‌مدت، یعنی میانگین سطح دامنه سیگنال در طول یک دوره زمانی کوتاه؛ این مقدار معمولاً بین ۰/۵ تا ۲/۰ ثانیه است. میانگین بلندمدت نیز یعنی میانگین سطح دامنه سیگنال در طول یک دوره زمانی بسیار بلندتر؛ این مقدار معمولاً چند ده ثانیه است. هنگامی که نسبت STA/LTA از مقدار معینی (معمولاً ۳ تا ۵) بیشتر شود؛ یک رویداد تشخیص داده می‌شود.

معمولاً داده‌های ثبت شده میکروتیرمورها با استفاده از روش‌های تفسیر مستقیم دامنه طیف فوریه و یا طیف چگالی توان (Kanai and Tanaka, 1954; Gutierrez and Sigh, 1992)، محاسبه نسبت طیفی داده‌های روی رسوب نسبت به یک ایستگاه مرجع بر روی سنگ بستر (Kagami et al., 1986; Seo, 1992) و محاسبه نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم در همان نقطه (HVSr-M) (Nakamura, 1989) تحلیل می‌شوند. روش HVSr-M که در این مطالعه استفاده شده است اولین بار توسط (Nogoshi and Igarashi (1970 and 1971) به کار گرفته شد و سپس توسط Nakamura (1989) استفاده از آن جهت تعیین اثر ساختمان عمومیت بیشتری یافت. به کار بردن این روش در تعداد زیادی از پروژه‌های تحقیقاتی ثابت کرده است که این روش در برآورد دوره تناوب طبیعی خاک بسیار مؤثر بوده و همچنین در تعیین ضریب بزرگنمایی خاک نیز می‌تواند به کار برده شود. برای این روش Nakamura (1989) فرض کرده است که مؤلفه قائم حرکت توسط لایه نرم خاک تقویت نمی‌شود، همچنین منبع لرزش محلی، نمی‌تواند حرکت میکروتیرمورها را در سنگ بستر تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین مشخصات مؤلفه قائم ثبت شده بر روی سطح زمین و سنگ بستر یکسان است. در نهایت می‌توان با تقسیم طیف مؤلفه افقی به مؤلفه قائم میکروتیرمورهای ثبت شده در سطح رسوب، اثرات ساختمان را به دست آورد.

۳- عوامل تأثیرگذار بر پردازش میکروتیرمورها

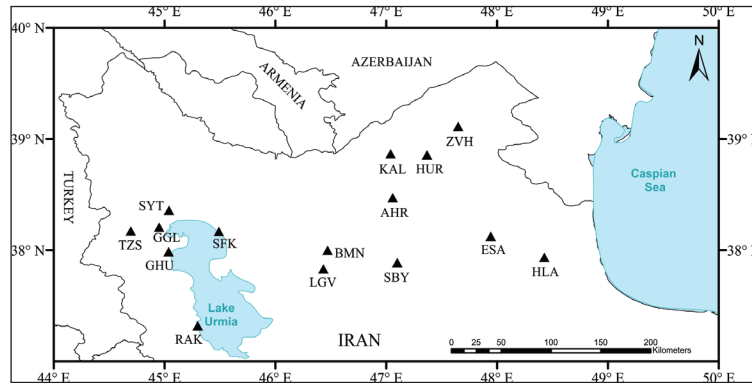
میکروتیرمورها لرزش خفیف زمین هستند که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی در نزدیکی محل نقطه‌ای اندازه‌گیری باشند. با توجه به اینکه عوامل تولید کننده این لرزش‌ها مشخص نیست و دائماً تغییر می‌کنند، میکروتیرمورها دارای ماهیتی متغیر هستند و بنابراین رکوردهای متفاوت در یک نقطه ثابت با هم تفاوت دارند؛ اما مشخصات مانای آنها که نشان‌دهنده ویژگی‌های ساختمان هستند، در طول زمان ثابت است. این مسئله سبب می‌شود که داده‌های میکروتیرمور در هر نقطه بدون در نظر گرفتن ویژگی‌های منبع لرزش حاوی اطلاعات مربوط به ساختمان باشند.

۳-۱. شرایط رکوردگیری میکروتیرمورها

مدت زمان ثبت رکورد میکروتیرمورها باید به اندازه‌ای باشد که بتواند اثرات ساختمان را به خوبی منعکس کند، بنابراین باید به اندازه کافی طولانی و متوالی باشد. همچنین طول رکورد می‌تواند با توجه به شرایط محیط و میزان نوفه‌های محلی انتخاب شود. به صورتی که در مکان‌های آرام می‌توان طول آن را کاهش داد. البته باید در نظر داشت که طول رکورد حداقل باید به اندازه‌ای باشد که فرکانس ساختمان به اندازه کافی در آن حضور داشته باشد که بتوان آن را در حوزه فرکانس به راحتی تشخیص داد. همچنین کمیته اروپایی SESAME (European Commission, 2004) طول رکورد را با متناسب با فرکانس مورد انتظار ساختمان می‌داند، به طوری که برای فرکانس‌های ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲، ۵ و ۱۰ هرتز به ترتیب طول رکوردی برابر با ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۵، ۳ و ۲ دقیقه مورد نیاز است. این مقادیر با توجه به تعداد و طول پنجره‌های انتخابی تعیین شده‌اند، بنابراین در صورت وجود نوفه‌های محلی در هنگام اندازه‌گیری میکروتیرمورها، تعداد پنجره‌های تحلیل کاهش می‌یابد، در نتیجه در چنین شرایطی لازم است که طول رکورد افزایش یابد. همچنین بایستی فرکانس نمونه‌برداری حداقل دو برابر بزرگ‌ترین فرکانس موجود در سیگنال باشد. حداقل فرکانس نمونه‌برداری را فرکانس نایکوئیست (Nyquist) می‌نامند.

۳-۲. طول پنجره‌های انتخابی

پس از ثبت میکروتیرمورها، بایستی بخش‌هایی از رکورد که فاقد نوفه‌های محلی هستند، انتخاب شوند و محاسبات بر اساس آنها صورت گیرد. برای این منظور از پنجره‌های با طول مشخص استفاده می‌شود. سپس با میانگین‌گیری از نسبت طیفی به دست آمده از پنجره‌ها، می‌توان مشخصات ساختمان حاصل شده از طول کامل رکورد را حدس زد. در صورت انتخاب پنجره‌هایی با مدت زمان کم، تعداد آنها



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری میکروتريمورها در شمال غرب ایران.

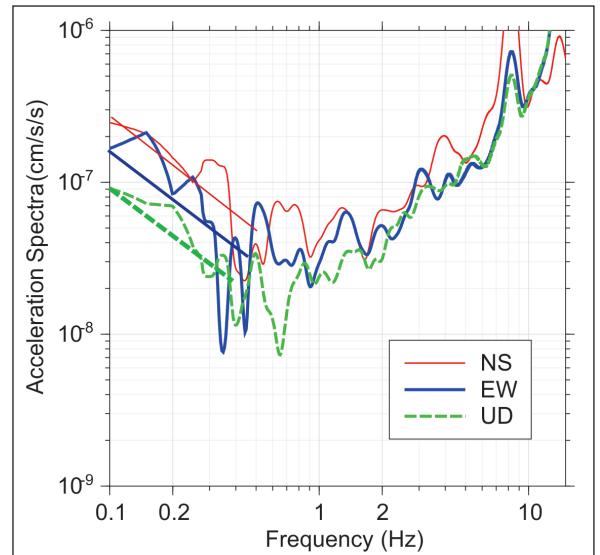
جدول ۱- مشخصات کامل ایستگاه‌ها و رکوردهای میکروتريمور اندازه‌گیری شده، میانگین سرعت موج برشی گزارش شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و طبقه‌بندی ساختگاه بر اساس آن.

ردیف	ایستگاه	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	تعداد رکورد	طول رکورد (دقیقه)	V_{s30} (m/s)	طبقه‌بندی ساختگاه
۱	اسلام‌آباد	ESA	۳۸/۱۲۶	۴۷/۹۴۴	۵	۲۰ و ۳۰ و ۳۰ و ۳۰	۸۳۳	I
۲	اهر	AHR	۳۸/۴۷۴	۴۷/۰۵۹	۴	۳۰ و ۳۰ و ۳۰ و ۳۰	-	-
۳	باسمنج	BMN	۳۸	۴۶/۴۷	۱	۳۰	۵۶۴	II
۴	تازه‌شهر	TZS	۳۸/۱۷۵	۴۴/۶۹۶	۱	۳۰	۳۰.۱	III
۵	رشکان	RAK	۳۷/۳۲۱	۴۵/۲۹۹	۲	۳۰ و ۳۰	۳۶۶	III
۶	زیوه	ZVH	۳۹/۱۱۴	۴۷/۶۴۸	۲	۳۰ و ۳۰	۳۰.۴	III
۷	سید تاج‌الدین	SYT	۳۸/۳۶۱	۴۵/۰۳۹	۱	۳۰	۴۵۶	II
۸	شربیان	SBY	۳۷/۸۹	۴۷/۱	۲	۳۰ و ۳۰	۴۸۴	II
۹	شرفخانه	SFK	۳۸/۱۷	۴۵/۴۹	۲	۳۰ و ۳۰	۴۶۶	II
۱۰	قره‌قشلاق	GGL	۳۸/۲۱	۴۴/۹۵	۳	۱۰ و ۲۰ و ۳۰	۲۲۲	II
۱۱	قوشچی	GHU	۳۷/۹۸۹	۴۵/۰۳۶	۳	۱۰ و ۲۰ و ۳۰	۴۵۷	II
۱۲	کلیر	KAL	۳۸/۸۷	۴۷/۰۴	۴	۳۰ و ۳۰ و ۳۰ و ۳۰	۸۵۰	I
۱۳	لیفوان	LGV	۳۷/۸۳۳	۴۶/۴۳۲	۲	۳۰ و ۳۰	-	-
۱۴	هل‌آباد	HLA	۳۷/۹۳۶	۴۸/۴۲۵	۱	۲۰	۳۸۷	II
۱۵	هوراند	HUR	۳۸/۸۵۸	۴۷/۳۶۹	۱	۳۰	-	-

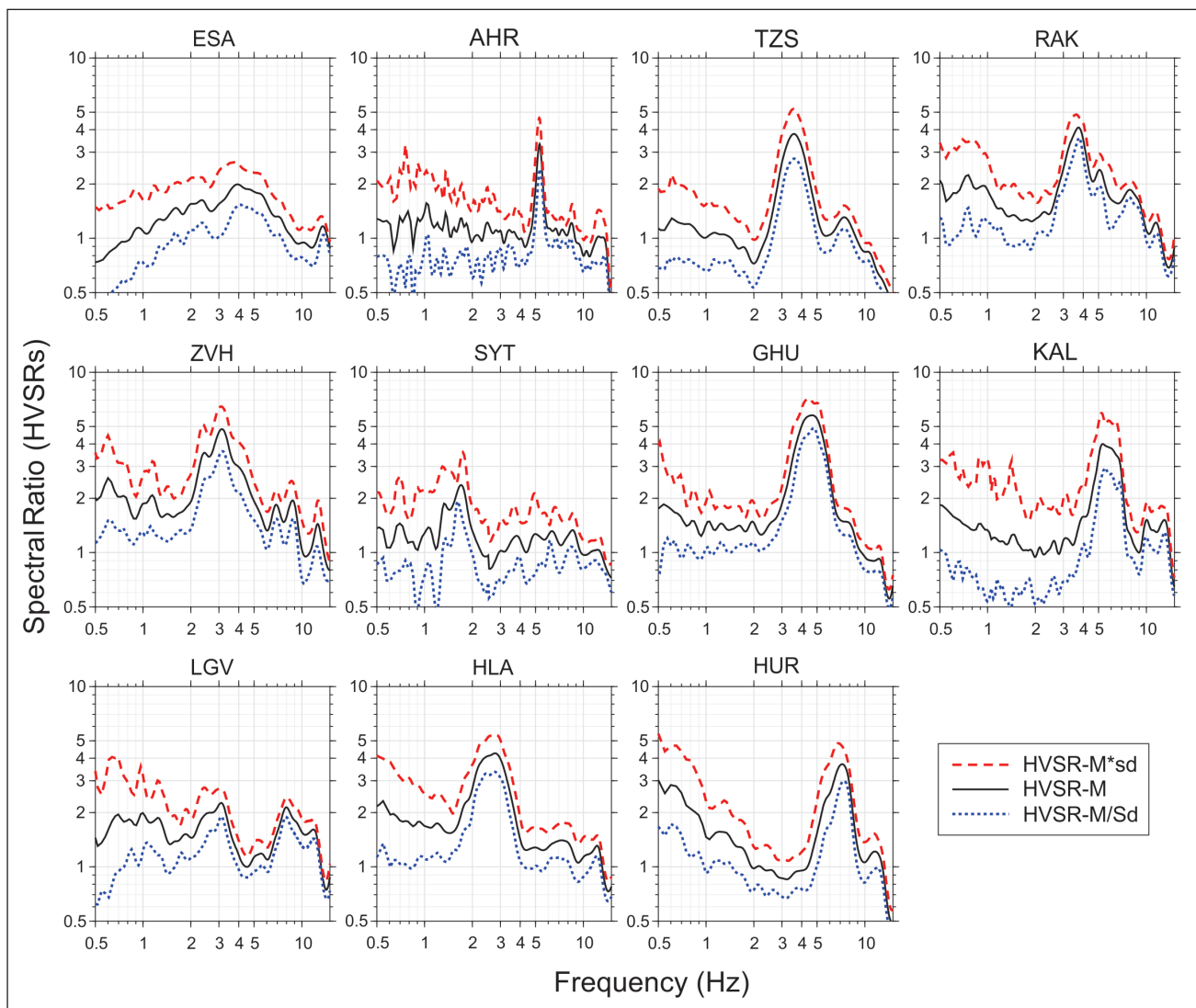
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود سطح طیف در فرکانس‌های پایین حالتی نزولی دارد که این حالت مربوط به وجود اثرات نویز دستگاه در طیف‌های به دست آمده است. برای مؤلفه قائم این نزول تا حدود فرکانس ۰/۴ هرتز و برای مؤلفه‌های افقی تا حدود ۰/۷ هرتز ادامه دارد. این مورد برای تمامی ایستگاه‌ها بررسی و مشاهده شد که برای همگی آنها سطح نزول طیف تا حدود فرکانس‌های ذکر شده است، بنابراین مقدار ۰/۵ هرتز برای تمام داده‌ها به عنوان شروع محدوده فرکانسی قابل اعتماد در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به اینکه در ایستگاه‌های اندازه‌گیری، ساختگاهی با جنس خاک بسیار سخت که دارای فرکانس بالا باشد، مشاهده نشد، محدوده بالای فرکانسی، ۱۵ هرتز تعیین شد.

برای تحلیل داده‌های ثبت شده، در ابتدا تصحیح خط مبنای رکوردها صورت گرفته است، این کار داده‌ها را بر روی خط محور صفر منتقل می‌کند و باعث می‌شود که رکورد شکل واقعی تری به خود بگیرد. همچنین یک Taper کسینوسی با طول ۵ درصد از طول پنجره بر داده‌های خام میکروتريمورها اعمال شده است. یکی از پارامترهایی که نسبت طیفی به دست آمده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، روش نرم کردن (Smoothing) طیف‌هاست. در این مطالعه از روش Konno and Ohmachi (1998) با پارامترهای ۴۰ و ۶۰ بسته به کیفیت نتیجه به دست آمده، بهره برده شده است. از میانگین‌گیری هندسی برای ترکیب مؤلفه‌های افقی استفاده شد. جهت تعیین محدوده فرکانسی، طیف شتاب داده‌های خام میکروتريمورها برای هر سه مؤلفه رسم شد،

پس از تحلیل داده‌های میکروتیرمور، دامنه‌های حداکثر برای نسبت طیفی به دست آمده در محدوده فرکانسی کمتر از ۱ هرتز مشاهده شد که با توجه به اینکه فرکانس‌های متناسب به این دامنه‌ها معمولاً مرتبط با خاک‌های بسیار نرم با لایه‌های رسوبی با ضخامت زیاد هستند (Zhao et al., 2006) و چنین محلی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری مشاهده نشد، می‌توان این نتایج را به اثرات نویز از قبیل وزش باد نسبت داد که در اکثر ایستگاه‌ها در طول اندازه‌گیری وجود داشت. راهنمای کمیته اروپایی SESAME (European Commission, 2004)، اندازه‌گیری میکروتیرمورها را در شرایطی که سرعت وزش باد بیشتر از ۵ کیلومتر در ساعت است توصیه نمی‌کند، چراکه باعث تأثیر شدید بر منحنی نسبت طیفی در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱ هرتز) می‌شود. پس از تحلیل داده‌های میکروتیرمور، در ۴ ایستگاه، SFK، GGH، BMN و SBY در حالی که شرایط اندازه‌گیری بسیار مناسب بود، در نسبت‌های طیفی به دست آمده پیک واضحی که بتوان بر اساس آن فرکانس غالب ساختمان را به درستی تعیین کرد، مشاهده نشد (احتمالاً به دلیل فقدان Contrast قوی بین لایه‌ها). در نتیجه این ۴ ایستگاه در ادامه مطالعه بررسی نشده‌اند. شکل ۳ نسبت طیفی به دست آمده از میکروتیرمورها را برای ۱۱ ایستگاه باقیمانده نشان می‌دهد. نتایج فرکانس و دوره تناوب طبیعی ساختمان به همراه دامنه نسبت طیفی برای هر ایستگاه در جدول ۶ آمده است.



شکل ۲- تعیین شروع بازه‌ی فرکانسی قابل اعتماد با استفاده از رسم طیف شتاب مولفه‌ی شمال-جنوب (NS)، شرق-غرب (EW) و قائم (UD) برای ایستگاه سیدتاج‌الدین. خطوط مستقیم محدوده نزول طیف‌های شتاب را نشان می‌دهند.



شکل ۳- نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (HVSRS-M)، نسبت طیفی ضرب شده در انحراف معیار ((HVSRS-M)*Sd) و نسبت طیفی تقسیم شده بر انحراف معیار (HVSRS-M/Sd).

کد مربوط به هر ایستگاه در بالای شکل نوشته شده است.

۵-۱. قابلیت اعتماد نتایج

کمیته اروپایی پروژه SESAME (European Commission, 2004) برای داشتن یک منحنی HVS-R-M قابل اعتماد ۳ معیار زیر را ارائه می‌کند:

$$f_0 > \frac{10}{l_w} \quad (1)$$

$$n f_0 > 200 \quad (2)$$

$$\sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ if } f_0 > 0.5\text{Hz} \quad (3)$$

$$\sigma_A(f) < 3 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ if } f_0 > 0.5\text{Hz}$$

برای نمونه، قابلیت اعتماد نتایج برای نسبت طیفی حاصل شده برای ایستگاه رشکان به صورت زیر بررسی شده است:

$$f_0 > \frac{10}{l_w} \Rightarrow 3.55\text{Hz} > 0.50\text{Hz}$$

$$n_c(f_0) = 20 \times 10 \times 3.55 = 710 > 200$$

$$\sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ if } f_0 > 0.5\text{Hz} \Rightarrow \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 1.78 < f < 7.1$$

$$\sigma_A(f) < 3 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0 \text{ if } f_0 < 0.5\text{Hz}$$

همچنین این کمیته لازم می‌داند که برای داشتن یک پیک واضح، دامنه نسبت طیفی بزرگ‌تر از ۲ باشد. معیارهای نام برده برای تمامی منحنی‌های نسبت طیفی این مطالعه اقناع می‌شوند.

۶- نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم حرکت زمین ثبت شده (HVS-R-E) در تعدادی از ایستگاه‌ها

برای بررسی بیشتر و اطمینان از نتایج به دست آمده، نسبت طیفی زمین لرزه ثبت شده (HVS-R-E) در ایستگاه‌ها محاسبه و سپس با نسبت طیفی حاصل از میکروتیریمورها (HVS-R-M) مقایسه می‌شوند. جهت محاسبه HVS-R-E، از رکوردهای ثبت شده توسط شبکه شتابنگاری کشور وابسته به مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استفاده شده است. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود. پردازش این شتابنگاشت‌ها همانند Samaei et al. (2016) انجام شده است.

بدین ترتیب که پس از بررسی چشمی رکوردها و تعیین بازه فرکانسی قابل استفاده، قسمت موج برشی آن جدا شده است؛ شروع پنجره موج برشی به صورت

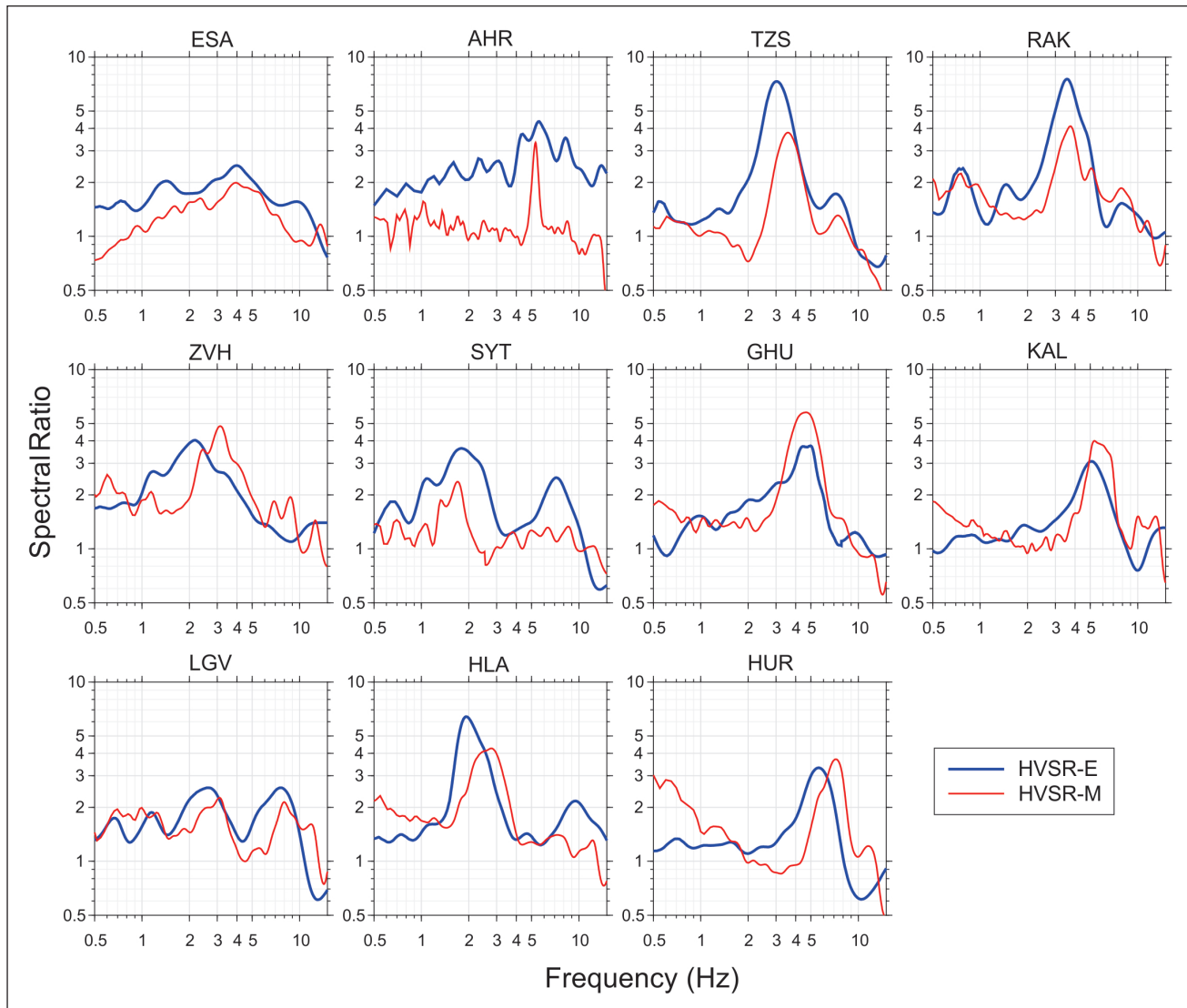
چشمی و پایان آن بر اساس رسیدن انرژی به ۹۵ درصد انرژی کل موج انتخاب شده است. یک Taper کسینوسی به طول ۵ درصد از طول پنجره بر داده‌ها اعمال شده است. همچنین برای نرم کردن (smoothing) از روش Konno and Ohmachi (1998) با پارامتر ۲۰ (Boore, 2009) استفاده شد. پس از پردازش رکوردها، نسبت طیفی HVS-R-E محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است نسبت طیفی به دست آمده از بخش موج برشی رکوردهای زمین لرزه و میکروتیریمورها دارای مشابهت قابل توجهی است که این مشابهت هم در فرکانس غالب و هم در دامنه به وضوح مشاهده می‌شود؛ گرچه به نظر می‌رسد در مورد دامنه، میکروتیریمورها به صورت سیستماتیک دامنه کمتری در مقایسه با رکوردهای زمین لرزه به دست می‌دهند.

قابل ذکر است که به هر حال در مورد استفاده از دامنه حاصل از نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (چه ناشی از زمین لرزه و چه ناشی از میکروتیریمورها) به عنوان بزرگنمایی ساختگاه باید احتیاط صورت گیرد. تعداد محدودی از مطالعات پیشین از قبیل Molnar and Cassidy (2006) و Lermo and Chavez-Garcia (1994) دامنه حاصل از مؤلفه افقی به قائم را منطبق با دامنه حاصل از نسبت طیفی استاندارد دانسته‌اند، در حالی که توصیه کمیته اروپایی پروژه SESAME (European Commission, 2004) آن است که دامنه مؤلفه افقی به قائم، حد پایینی از بزرگنمایی ساختگاه در نظر گرفته شود. به نظر می‌رسد که بهترین نتایج از روش مؤلفه افقی به قائم برای ساختارهای ساده خاک، یعنی وجود یک لایه نرم بر روی لایه سخت حاصل شود (Konno and Ohmachi, 1998).

با توجه به شکل ۱، ایستگاه‌های RAK و GHU که در ساحل دریاچه ارومیه قرار گرفته‌اند، دارای فرکانس غالب و سرعت موج برشی پایینی هستند که این نتایج با توجه به احتمال وجود انباشته‌های رسوبی ناشی از دریاچه، مورد انتظار است. همچنین برای ایستگاه HUR که نسبت به سایر ایستگاه‌ها فرکانسی بالاتر (۷/۳۴ هرتز) دارد، نتیجه حاصل شده با مشاهدات سازگار است، چرا که در محل اندازه‌گیری میکروتیریمورها در این ایستگاه بیرون‌زدگی‌های سنگی به وضوح قابل مشاهده بودند که می‌تواند دلیل مناسبی برای بالا بودن فرکانس غالب تعیین شده باشد.

جدول ۲- مشخصات رکوردهای استفاده شده برای تعیین نسبت HVS-R-E در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ردیف	ایستگاه	کد ایستگاه	تعداد رکورد	بزرگی گشتاوری
۱	اسلام‌آباد	ESA	۳۶	۲/۲-۶/۲
۲	اهر	AHR	۴۶	۲/۹-۶/۲
۳	تازه‌شهر	TZS	۱۰	۳/۴-۵/۱
۴	رشکان	RAK	۵	۲/۷-۶/۲
۵	زیوه	ZVH	۶	۴/۲-۶/۲
۶	سید تاج‌الدین	SYT	۲۳	۳/۲-۵/۳
۷	قوشچی	GHU	۵	۴/۲-۶/۲
۸	کلپیر	KAL	۱۳	۳/۸-۶/۲
۹	لیقوان	LGV	۶	۴/۱-۶/۲
۱۰	هل‌آباد	HLA	۱۰	۳/۸-۶/۲
۱۱	هوراند	HUR	۱۹	۴/۵-۶/۲



شکل ۴- مقایسه نسبت طیفی به دست آمده از حرکت‌های زمین ثبت شده (HVSR-E) و میکروتیریمورها (HVSR-M).

۷- طبقه‌بندی ساختمان

شده توسط BHRC، طبقه‌بندی ساختمان در چهار گروه صورت گرفته است. در جدول ۶ سرعت موج برشی و طبقه‌بندی ساختمان‌های مورد مطالعه بر اساس تحقیقات Zare et al. (1999) مشاهده می‌شود.

۷-۳. مطالعه Komak Panah et al. (2002)

در این مطالعه نیز همانند دو مورد قبل با استفاده از شتابنگاشت‌های ثبت شده در ۵۰ ایستگاه شرق ایران نسبت طیفی برای هر کدام از آنها محاسبه شده و در نهایت با توجه به سرعت موج برشی هر ایستگاه و مطالعات زمین‌شناسی، طبقه‌بندی در چهار گروه صورت پذیرفته است که اطلاعات آن در جدول ۵ مشاهده می‌شود. در مطالعه حاضر نیز سرعت موج برشی و طبقه‌بندی ساختمان بر اساس نتایج آنها انجام شده و در جدول ۶ آمده است.

۷-۴. استفاده از روابط تجربی ارتباط دهنده فرکانس غالب ساختمان و متوسط

سرعت موج برشی در ۳۰ متری بالایی خاک

برای این منظور رابطه ۴ انتخاب می‌شود که در (Ghofrani et al. 2012) ارائه شده است:

$$\log(f_p) = 1.89 \log(V_{s30}) - 4.429 \quad (4)$$

در این قسمت، با توجه به فرکانس غالب به دست آمده از میکروتیریمورها، طبقه‌بندی ساختمان بر اساس آیین‌نامه‌های انجمن راه‌آین (Japan Road Association, 1980; 1990)، NEHRP (Building Seismic Safety Council, 2000) و استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم، ۱۳۹۳) ایران انجام گرفته است. برای این منظور از مطالعاتی استفاده شده است که فرکانس غالب و یا دوره تناوب ساختمان را با سرعت موج برشی و نوع خاک ساختمان ارتباط داده‌اند که عبارتند از:

۷-۱. مطالعه Zhao et al. (2006)

در جدول ۳ دوره تناوب ساختمان با سرعت موج برشی و نوع خاک در ارتباط است. بنابراین می‌توان با استفاده از نتایج به دست آمده از میکروتیریمورها بازه‌ای را انتخاب کرد که دوره تناوب ساختمان به دست آمده از میکروتیریمورها در آن قرار می‌گیرد. در نهایت طبقه‌بندی ساختمان‌های مورد مطالعه بر اساس آیین‌نامه‌های انجمن راه‌آین و NEHRP انجام شده است که نتایج آن در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

۷-۲. مطالعه Zare et al. (1999)

در این مطالعه نیز مطابق جدول ۴ با استفاده از فرکانس غالب حاصل شده از نسبت‌های طیفی رکوردهای زمین‌لرزه و میکروتیریمورها و سرعت موج برشی ارائه

تقسیم‌بندی (Zhao et al., 2006) ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر بر ثانیه، از تقسیم‌بندی (Zare et al., 1999) ۳۰۰ تا ۵۵۰ متر بر ثانیه، از تقسیم‌بندی (Komak Panah et al., 2002) ۳۵۰ تا ۵۵۰ متر بر ثانیه و از رابطه تجربی (Ghofrani et al., 2012) ۴۵۷ متر بر ثانیه به دست می‌آید. مقایسه نتایج جدول‌های ۱ و ۶ نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه بین تقسیم‌بندی بر اساس مقادیر ارائه شده برای V_{s30} توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و تقسیم‌بندی بر اساس فرکانس غالب ساختگاه است؛ برای مثال سه ایستگاه TKS، RAK، ZVH و بر اساس سرعت موج برشی ارائه شده زمین نوع III اما در رده‌بندی بر اساس فرکانس غالب زمین نوع II دارند، از سوی دیگر ایستگاه SYT بر اساس سرعت موج برشی ارائه شده، دارای زمین نوع II اما در رده‌بندی بر اساس فرکانس غالب، دارای زمین نوع III هستند.

در رابطه بالا، لگاریتم‌ها بر مبنای ۱۰ هستند. این رابطه بر اساس نتایج فرکانس غالب تعیین شده با استفاده از روش HVSR-E برای ایستگاه‌های Kik-Net کشور ژاپن تعریف شده است. با جاگذاری مقادیر فرکانس غالب نتیجه شده از میکروتریمورها در رابطه فوق، سرعت موج برشی برای هر ساختگاه به دست می‌آید. در نهایت بر اساس سرعت موج برشی و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳)، طبقه‌بندی نوع خاک ساختگاه نیز صورت گرفت که در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. اولین نکته‌ای که با نگاه به جدول ۶ به نظر می‌رسد آن است که، اگر چه چهار تقسیم‌بندی فوق در تعریف مرزبندی بین نوع زمین با هم تفاوت‌های اندکی دارند، اما در نهایت اگر هدف، تعریف نوع زمین یا محدوده V_{s30} باشد، نتایج نهایی با هم سازگارند. برای مثال در مورد ایستگاه ESA، سرعت موج برشی در ۳۰ متر ابتدایی از

جدول ۳- طبقه‌بندی ساختگاه بر اساس انجمن راه ژاپن و آیین‌نامه NEHRP (Zhao et al., 2006).

طبقه‌بندی انجمن راه ژاپن	دوره تناوب (ثانیه)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	طبقه‌بندی NEHRP
SC I (سنگ/خاک سفت)	$T > 0.2$	$V_{s30} > 600$	A+B
SC II (خاک سخت)	$0.2 = T > 0.4$	$300 < V_{s30} = 600$	C
SC III (خاک متوسط)	$0.4 = T > 0.6$	$200 < V_{s30} = 300$	D
SC IV (خاک نرم)	$T < 0.6$	$V_{s30} < 200$	E

جدول ۴- سرعت موج برشی و طبقه‌بندی ساختگاه بر اساس فرکانس غالب (Zare et al., 1999).

گروه	فرکانس (هرتز)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	نوع خاک
۱	$f_0 \leq 15$	$V_{s30} \geq 700$	سنگی
۲	$5 = f_0 < 15$	$500 \leq V_{s30} < 700$	آبرفت سخت
۳	$2 = f_0 < 5$	$300 \leq V_{s30} < 500$	آبرفت نرم
۴	$f_0 \leq 2$	$V_{s30} < 300$	خاک نرم

جدول ۵- سرعت موج برشی و طبقه‌بندی ساختگاه بر اساس فرکانس غالب (Komak Panah et al., 2002).

گروه	فرکانس (هرتز)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	نوع خاک
I	$< 2/5$	< 350	خاک نرم
IIa	$2/5-5$	$350-550$	خاک متوسط
IIb	$5-7/5$	$550-750$	خاک سخت
III	$> 7/5$	> 750	خاک خیلی سخت/سنگ نرم

جدول ۶- تعیین سرعت موج برشی و طبقه‌بندی نوع خاک ساختمان در ایستگاه‌های اندازه‌گیری میکروترسومترها.

طبقه‌بندی ساختمان	$V_{S30} (m/s)$ رابطه (۴)	طبقه‌بندی ساختمان	$V_{S30} (m/s)$	طبقه‌بندی ساختمان	$V_{S30} (m/s)$	طبقه‌بندی ساختمان		$V_{S30} (m/s)$	دامنه نسبت طبیعی	دوره تناوب طبیعی (ثانیه)	فرکانس غالب (هرتز)	کد ایستگاه	ردیف
						NEHRP	انجمن راه‌آهن						
II	۴۶۸	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۷/۰۱	۰/۲۴	۴/۱۰	ESA	۱
II	۵۳۷	IIb	۵۵۰-۷۵۰	۲	$۵۰۰ \leq V_{S30} < ۷۰۰$	A+B	SC I	$V_{S30} > ۶۰۰$	۳/۴۳	۰/۱۸	۵/۳۵	AHR	۲
II	۴۳۶	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۳/۷۹	۰/۲۸	۳/۵۶	TZS	۳
II	۴۴۷	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۴/۱۷	۰/۲۷	۳/۷۴	RAK	۴
II	۴۰۷	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۴/۸۳	۰/۳۲	۳/۱۶	ZVH	۵
III	۲۹۵	I	< ۳۵۰	۴	$V_{S30} < ۳۰۰$	D	SC III	$۲۰۰ < V_{S30} = ۳۰۰$	۷/۳۷	۰/۵۸	۱/۷۲	SYT	۶
II	۵۰۱	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۵/۷۷	۰/۲۱	۴/۶۶	GHU	۷
II	۵۳۷	IIb	۵۵۰-۷۵۰	۲	$۵۰۰ \leq V_{S30} < ۷۰۰$	A+B	SC I	$V_{S30} > ۶۰۰$	۴/۰۳	۰/۱۹	۵/۳۵	KAL	۸
II	۴۱۷	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۷/۲۸	۰/۳۰	۳/۳۸	LGV	۹
II	۷۸۰	IIa	۳۵۰-۵۵۰	۳	$۳۰۰ \leq V_{S30} < ۵۰۰$	C	SC II	$۳۰۰ < V_{S30} = ۶۰۰$	۴/۲۶	۰/۳۶	۷/۸۰	HLA	۱۰
II	۶۳۱	IIb	۵۵۰-۷۵۰	۲	$۵۰۰ \leq V_{S30} < ۷۰۰$	A+B	SC I	$V_{S30} > ۶۰۰$	۳/۶۸	۰/۱۴	۷/۳۴	HUR	۱۱

که فرکانس غالب و تا حدودی دامنه نسبت طیفی برای هر دو روش یکسان به دست آمد. نتیجه تحلیل داده‌های میکروتیرمورها برای ایستگاه‌های باقیمانده نشان داد که برای خاک‌های نرم با سرعت موج برشی پایین، فرکانس غالب کمتری به دست می‌آید که این مورد را می‌توان در ایستگاه‌های واقع در کنار دریاچه ارومیه مشاهده کرد. طبقه‌بندی صورت گرفته بر اساس فرکانس غالب حاصل شده از میکروتیرمورها به کمک مطالعات گذشته و روابط تجربی، با طبقه‌بندی انجام گرفته با توجه استاندارد ۲۸۰۰ ایران بر اساس سرعت موج برشی ارائه شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. وجود اختلاف در نتایج می‌تواند ناشی از عدم قطعیت مربوط به پیک مشاهده شده برای نسبت طیفی میکروتیرمورها و سرعت موج برشی معرفی شده به وسیله مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی باشد. در نهایت بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته با توجه به سه آیین‌نامه موجود و مطالعات گذشته، ساختگاه‌ها دارای نوع خاک متوسط تا سخت هستند، که ۱۰ ایستگاه خاک نوع II و یک ایستگاه دیگر خاک نوع III (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران) دارند.

سیاسگزار

مطالعه حاضر، خروجی نتایج طرح پژوهشی تصویب شده در شورای پژوهشی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان است، بدین وسیله از این دانشگاه به خاطر تأمین هزینه‌های مالی، انجام هماهنگی‌ها و صدور مجوزهای لازم برای سازمان‌های مربوطه تشکر و قدردانی می‌شود. از پروفسور ماساکاتسو میاجیما، استاد دانشگاه کانازاواوی ژاپن برای در اختیار قرار دادن دستگاه اندازه‌گیری میکروتیرمورها و از هیروشی کاواسه، استاد دانشگاه کیوتوی ژاپن، برای کمک در تحلیل دقیق نتایج سیاسگزاری می‌شود. از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، خصوصاً جناب آقای مهندس اسماعیل فرزندگان جهت فراهم کردن شتابنگاشت‌های مورد استفاده و در انتها از فرماندهی نیروی انتظامی استان آذربایجان شرقی، سرهنگ مهدیخانی و سرهنگ علیپور که هماهنگی‌های لازم و سودمند را با نیروی انتظامی تمامی شهرستان‌های شمال غرب انجام دادند و همچنین آقای عرفان کریمی برای یاری در اندازه‌گیری میکروتیرمورها تشکر می‌شود.

تفسیر دلیل اختلاف مشاهده شده کار ساده‌ای نیست، اما می‌توان دو دلیل اولیه زیر را برشمرد:

(۱) عدم قطعیت‌های موجود در پیک مشاهده شده از نسبت طیفی و در نتیجه فرکانس غالب ساختگاه؛

(۲) عدم قطعیت در مقادیر سرعت موج برشی منتشر شده توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، به این دلیل که آزمایشات سرعت موج برشی در ایستگاه‌های شتابنگاری انجام شده توسط این مرکز با روش انکساری است و با توجه به محدودیت‌های مختلف این روش، از جمله محدود بودن قدرت منبع لرزه‌ای، می‌تواند دارای عدم قطعیت‌های بزرگ در مقایسه با روش‌های Borehole باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای تعیین فرکانس غالب و پررود طبیعی ساختگاه در ۱۵ ایستگاه شتابنگاری واقع در شمال غرب ایران از میکروتیرمورها استفاده شد. استفاده از میکروتیرمورها جهت تعیین اثرات ساختگاه نیازمند صرف زمان کم و در عین حال بسیار کم‌هزینه‌تر از روش‌های دیگر از قبیل گمانه‌زنی است. روش تحلیل نسبت طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم (HVS-R) که در این مطالعه به کار گرفته شد، روشی ساده و کاربردی است به شکلی که می‌توان با اندازه‌گیری تنها در یک نقطه به نتایج مناسبی رسید. در صورتی که پارامترهای تحلیل داده‌ها، از قبیل روش صاف کردن طیف‌ها و همچنین تعیین پنجره‌های با طول مناسب، به درستی انتخاب شوند، می‌توان اطلاعات قابل اعتمادی را برای اثرات ساختگاه استخراج کرد. در نتایج برخی از ایستگاه‌ها دامنه حداکثر نسبت طیفی در فرکانس‌های کمتر از یک هرترز مشاهده شد، این نتیجه می‌تواند مربوط به اثرات نویز، مانند وزش باد و یا حرکت ساختمان‌ها در اثر آن باشد، همچنین برای تعیین محدوده پایین فرکانسی قابل اعتماد، لازم است طیف فوریه شتاب برای هر سه مؤلفه خام میکروتیرمورها رسم شود. محدوده فرکانسی که در آن طیف‌ها نزول می‌کنند، ناشی از اثرات نویز دستگاه است که بایستی حذف شود. چهار ایستگاه SBY، GGH، SFK، BMN به دلیل عدم وجود پیک مشخص که می‌تواند ناشی از فقدان Contrast قوی بین لایه‌ها باشد، از مطالعه حذف شدند. مقایسه نتایج HVS-R و HVS-E نشان‌دهنده انطباق خوب نتایج است، به گونه‌ای

کتابنگاری

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، ویرایش چهارم، ۱۹ ص.

References

- Atakan, K., Bard, P. Y., Kind, F., Moreno, B., Roquette, P., Tenta, A., Acerra, C., Aguacil, G., Basili, R., Blarel, F., Bordoni, P., Cadet, H., Caserta, A., Cotton, F., Dimitriu, P., Fäh, D., Franco, R., Giulio, G., Grandison, M., Guillier, B., Haghshenas, E., Havskov, J., Koehler, A., Kristek, J., Lacave, C., Maresca, R., Marra, F., Moreno, B., Ohrnberger, M., Oprsal, I., Panou, A., Querendez, E., Richter, G., Roquette, P., Savvaidis, A., Scherbaum, F., Tenta, A., Theodulidis, N., Utheim, T., Vidal, S., Vollmer, D., Woessner, J., Wolff, K. and Zacharopoulos, S., 2004- J-sesame a standardized software solution for the H/V spectral ratio technique. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 2270.
- Bard, P. Y. Kind, F., Moreno, B., Roquette, P., Tenta, A., Acerra, C., Aguacil, G., Basili, R., Blarel, F., Bordoni, P., Cadet, H., Caserta, A., Cotton, F., Dimitriu, P., Fäh, D., Franco, R., Giulio, G., Grandison, M., Guillier, B., Haghshenas, E., Havskov, J., Koehler, A., Kristek, J., Lacave, C., Maresca, R., Marra, F., Moreno, B., Ohrnberger, M., Oprsal, I., Panou, A., Querendez, E., Richter, G., Roquette, P., Savvaidis, A., Scherbaum, F., Tenta, A., Theodulidis, N., Utheim, T., Vidal, S., Vollmer, D., Woessner, J., Wolff, K. and Zacharopoulos, S., 2004- The SESAME project: An overview and main results, in Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper #2207.
- Borcherdt, R. D., 1970- Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seismol. Soc. Am. 60, 29- 61.
- Boore, D. M., 2009- TSPP---A collection of FORTRAN program for processing and manipulating time series. USGS, Version 2.0.
- Building Seismic Safety Council (BSSC), 2000- The 2000 NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures, Part I (Provisions) and Part II (Commentary), FEMA 368/369, Washington, D.C.
- European Commission, 2004- Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations; Measurements, Processing and Interpretation, Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Field, E. H. and Jacob, K. H., 1995- A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, Bull. Seismol. Soc. Am. 85, 1127- 1143.

- Ghofrani, H., Atkinson, G. M. and Goda, K., 2012- Implications of the 2011 M 9.0 Tohoku Japan earthquake for the treatment of site effects in large earthquakes, *Bull Earthquake Eng.*, Vol. 11, 171- 203.
- Gutierrez, C. and Sigh, S. K., 1992- A Site effect Study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of Results from Strong Ground Motion and Microtremor Data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 642- 659.
- Hays, W. W., 1986- Site amplification of earthquake ground motion, *Proceedings, 3rd U.S. National Earthquake Engineering Conference*, August 24- 28, 1986, Charleston, N.C., Earthquake Engineering Research Institute, 1, 357- 368.
- Horike, M., 1985- Inversion of phase velocity of long-frequency microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, *J. Phys. Earth.* 33, 59- 96.
- Horike, M., Zhao, B. and Kawase, H., 2001- Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake shear waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 1526- 1536.
- Japan Road Association, 1980- Specifications for Highway Bridges Part V, Seismic Design, Maruzen Co., LTD.
- Japan Road Association, 1990- Specifications for Highway Bridges Part V, Seismic Design, Maruzen Co., LTD.
- Kagami, H., Duke, C. M., Liang, G. C. and Ohta Y., 1982- Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. II. Evaluation of site effect upon seismic wave amplification due to extremely deep soil deposits, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 987- 998.
- Kagami, H., Okada, S., Shino, K., Oner, M., Darvinski, M. and Mal, A. K., 1986- Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III. A two-dimensional study of site effects in S. Fernando valley. *Bull. Seism. Soc. Am.* 76, 1801- 1812.
- Kanai, K. and Takana, T., 1954- Measurements of the microtremor. *Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University*, 32, 199- 209.
- Kanai, K. and Tanaka, T., 1961- On microtremors VIII. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 39, 97- 114.
- Komak Panah, A., Moghaddas, N. H., Ghayamghamian, M. R., Motosaka, M., Jafari, M. K. and Uromieh, A., 2002- Site Effect Classification in East-Central of Iran, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering: Spring 2002*, Vol. 4, No. 1, 37- 46.
- Konno, K. and Ohmachi, T., 1998- Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 228- 241.
- Lachet, C. and Bard, P. Y., 1994- Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth* 42, 377- 397.
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P. Y., Theodulidis, C. P. and Savvaïdis, A., 1996- Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki _Greece_: Comparison of different approaches, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, 1692- 1703.
- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F. J., 1994- Are microtremors useful in site response evaluation? *Bull. Seismol. Soc. Am.* 84, 1350- 1364.
- Molnar, S. and Cassidy, F. J., 2006- A comparison of site response technique using weak motion earthquakes and microtremors. *Earthquake spectra*, 22 (1), 169- 188.
- Nakamura, Y., 1989- A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute* 30, 25- 33.
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1970- On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280 (in Japanese with English abstract).
- Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971- On the amplitude characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, 24, 24- 40 (in Japanese with English abstract).
- Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N. and Kudo, K., 1978- Observation of 1- to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. I. Comparison with long-frequency accelerations at the Tokachioki earthquake of 1968, *Bull. Seism. Soc. Am.* 68, 767- 779.
- Okada, H., Matsushima, T. Moriya, T. and Sasatani, T., 1990- An exploration technique using long-frequency microtremors for determination of deep geological structures under urbanized areas, *Butsuri-Tansa*, 43, 402-417 (in Japanese with English abstract).
- Samaei, M., Miyajima, M. and Nojima N., 2016- Attenuation of Fourier Spectra for 2012 Ahar-Varzaghan Double Earthquakes, Northwestern Iran, *Journal of Earth and Space Physics*, Vol. 41, No. 4, 23- 38.
- Satoh, T., Kawase, H. and Matsushima, S., 2001- Differences between site characteristics obtained from microtremors, S-waves, P-waves, and Cudas, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91 (2), 313- 334.
- Seo, K. and Samano, T., 1992- Application of microtremors to predicting earthquake ground motions, in *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Sendai, Japan*. B-2, 107-108 (in Japanese).
- Seo, K., 1992- A joint work for measurements of microtremors in the Ashigara valley. *Int.*
- Tokimatsu, K. and Miyadera, Y., 1992- Characteristics of Rayleigh waves in microtremors and their relation to underground structures, *J. Struct. Constr. Eng. Trans. Architectural Inst. Japan*. 439, 81- 87 (in Japanese with English abstract).
- Tokimatsu, K., Nakajo, Y. and Tamura, S., 1994- Horizontal-to-vertical amplitude ratio of short-frequency microtremors and its relation to site characteristics, *J. Struct. Constr. Eng. Trans. Architectural Inst. Japan*. 457, 11- 18 (in Japanese with English abstract).
- Wakamatsu, K. and Yasui, Y., 1995- Possibility of estimation for amplification characteristics of soil deposits based on ratio of horizontal to vertical spectra of microtremors, *J. Struct. Constr. Eng. Trans. Architectural Inst. Japan*. 471, 61- 70 (in Japanese with English abstract).
- Zare, M., Bard, P. Y. and Ghofrany-Ashtiyany, M., 1999- Site Characterizations for the Iranian Strong Motion Network, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, 101- 123.
- Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T. and Ogawa, H., 2006- An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96, 914- 925.

Determination of dominant frequency and site classification using microtremor measurements for some strong motion stations in North-Western Iran

A. Fallahi¹, M. Samaei^{2*} and J. Karashi³

¹Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

²Researcher, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Gifu University, Gifu, Japan

³M.Sc., Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 2017 August 22

Accepted: 2018 April 30

Abstract

In the current study, using microtremor measurements at 15 stations of strong ground motion network in North-western Iran, dominant frequency is determined and sites are categorized. After correction of raw data, horizontal to vertical spectral ratio is calculated and the frequency corresponding to the greatest amplitude is acknowledged as the dominant frequency. Also at 11 stations with good quality of recorded microtremors, horizontal to vertical ratio of earthquake motion is calculated. Agreement between these two spectral ratios is quite satisfactory. Maximum and minimum observed dominant frequencies are 1.72 and 7.34 respectively. Correspondingly, using past studies, shear wave at the top 30 m is estimated and based on different seismic codes, sites are categorized. If the categorization based on predominant frequency is compared with categorization based on reported by building and housing research center, dramatic differences will be observed. These differences could be attributed to uncertainties in reported V_{s30} as well as estimated dominant frequencies.

Keywords: Microtremors, Strong motion station, Dominant frequency, Natural period, HVSR-M, HVSR-E, Site classification

For Persian Version see pages 217 to 226

*Corresponding author: M. Samaei; E-mail: meghdad.samaei@gmail.com