بررسی اثرات ساختگاهی با استفاده از روش تجربی $\frac{H}{V}$ و عددی در کرج

نسترن احسانی*، محمدرضا قائمقامیان؛
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
محسن فضلوی؛ دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
ابراهیم حق‌شناس؛ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

تاریخ: دریافت ۹۳/۱۲/۵ **پذیرش** ۹٤/۱۱/۹

چکیده

به‌منظور برآورد اثرات ساختگاهی در شهر کرج از تحلیل طیفی $\frac{H}{V}$ روی داده‌های میکروترمور در ۳۷ نقطه شهر در راستای پروفیل شمالی- جنوب غربی استفاده شد که فرکانس غالب آن در محدودهٔ ۰/٤ تا ۲ هرتز بود. نتایج نسبت طیفی $\frac{H}{V}$ تحت اثر شرایط محلی ساختار زمین‌شناسی منطقه است بر مبنای این فرض می‌توان منحنی $\frac{H}{V}$ تئوری را با شناخت از ساختار زمین‌شناسی منطقه تولید کرد. بنابراین مدل‌سازی یک‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Deepsoil به‌روش خطی در سطوح کرنش پایین با توجه به داده‌های زمین‌شناسی، درون چاهی و آرایه‌ای انجام شد و نتایج حاصل با مدل تجربی قیاس شدند. نتیجه مدل‌سازی یک‌بعدی نمایان‌گر وجود کنتراست مؤثر در عمق ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر است. هم‌چنین با در نظر گرفتن سازند کرج به‌عنوان پی‌سنگ در دو کیلومتری زمین در مدل‌سازی عددی شاهد ایجاد توابع بزرگ‌نمایی در محدودهٔ بسامدهای کم‌تر از یک هرتز هستیم که ناشی از کنتراست عمیق در اثر تفاوت جنس سنگ‌بستر است که با قله‌های مدل تجربی مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: اثر ساختگاه، میکروترمور، تحلیل طیفی $\frac{H}{V}$، فرکانس غالب، مدل‌سازی یک‌بعدی

* **نویسنده مسئول** nastaranehsani_geo@yahoo.com

مقدمه

زمین‌لرزه از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که همواره جوامع انسانی را از لحاظ مالی و جانی تهدید می‌کند. کشور ایران به‌واسطه قرار گرفتن روی کمربند کوه‌زایی آلپ هیمالیا جز کشورهای لرزه‌خیز در دنیا هست. از سوی دیگر جمعیت رو به رشد و احداث ساختمان‌های مرتفع، خسارت‌های ناشی از این زمین‌لرزه‌های بزرگ را خصوصاً در شهرهای بزرگ افزایش می‌دهد. کرج از شهرهای پرجمعیت ایران است که در سال‌های اخیر توسعه صنعتی و اقتصادی چشم‌گیری داشته است.

هنگام رخداد زلزله امواج لرزه‌ای از چشمه منتشر می‌شوند و به‌سرعت به پوستهٔ زمین می‌رسند. این امواج پس از رسیدن به سطح تولید لرزش می‌کند که بین چند ثانیه تا چند دقیقه تغییر می‌کند. در طی زلزله آبرفت‌های مختلف با ساختارهای متفاوت عکس‌العمل متفاوت را نشان می‌دهند. در کنار دو پارامتر مهم بزرگی زلزله و فاصله از گسل، شرایط زمین‌شناسی محلی و ژئوتکنیکی خاک که به‌عنوان اثرات ساختگاه شناخته می‌شوند می‌توانند در تغییر حرکات جنبش زمین مانند دامنه، فرکانس و طول دوام جنبش نیرومند طی زلزله مؤثر باشند (Kramer, 1996) [۱۶]. حرکات لرزه‌ای در هر ساختگاه به‌وسیلهٔ نوع خاک آن منطقه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رسوبات نرم‌تر و جوان‌تر حرکات زمین‌لرزه را معمولاً نسبت به رسوبات قدیمی‌تر و سنگ‌بستر تقویت می‌کند (Purnachandra Rao et al., 2011) [۲۰].

برای ارزیابی اثرات ساختگاهی استفاده از دو روش تجربی و عددی مرسوم است. در روش تئوری و عددی اثرات ساختگاهی با استفاده از معادلات ریاضی بررسی شدند که نیازمند اطلاعات گمانه و ویژگی دینامیکی ساختگاه است و پاسخ خاک به‌صورت نظری با توجه به تئوری انتشار امواج در خاک و با داشتن مشخصات خاک مانند سرعت موج‌برشی، ضخامت و چگالی به‌دست می‌آید. برای تعیین خصوصیات ستون خاک در منطقه بررسی شده استفاده از داده‌های درون‌چاهی، بالاچاهی، میان‌چاهی، لرزه‌ای بازتابی، شکست مرزی، تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW)، تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW) و داده‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود. این اطلاعات به‌عنوان داده‌های ورودی در روش عددی به‌کار می‌رود که روش پرهزینه

و زمان‌بر است. در روش تجربی اثرات ساختگاه با استفاده از داده‌های زلزله، انفجار و میکروترمور بررسی می‌شوند که بهترین روش استفاده از داده‌های جنبش شدید به‌وسیلهٔ زلزله‌های محلی است. اما با توجه کمبود رخداد زلزله در برخی مناطق، از این روش نمی‌توان برای ارزیابی ساختگاه شهری بهره جست. اندازه‌گیری ارتعاشات محیطی میکروترمورها به لحاظ آسانی، اقتصادی بودن و در دسترس بودن در همه زمان‌ها و مکان‌ها، روشی مناسب برای ارزیابی اثرات ساختگاه در مناطق شهری است (Bard, 2000; Field and Jacob, 1993; Nakamura, 1989) [۵]، [۸]، [۱۸].

در این بررسی فرکانس غالب ساختگاه کرج با استفاده از تحلیل طیفی $\frac{H}{V}$ (تکنیک ناکامورا) روی داده‌های میکروترمور در ۳۷ نقطه شهر در راستای پروفیل شمالی- جنوب غربی برآورد شده است. به‌علاوه مدل‌سازی عددی یک‌بعدی با استفاده از Deepsoil با توجه به داده‌های درون‌چاهی، آرایه‌ای، زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی انجام شده است و توابع بزرگ‌نمایی حاصل از روش تجربی و عددی با هم قیاس شده است.

اثرات ساختگاهی

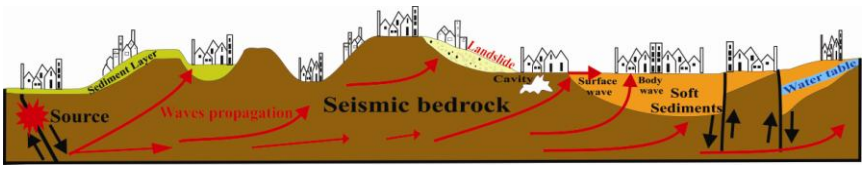
بسیاری از زلزله‌های مخرب دهه‌های اخیر (مانند زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵، یونان۱۹۸۹، کوبه ژاپن ۱۹۹۵، منجیل ۱۹۹۰، تایوان۱۹۹۹، بم ۲۰۰۳ و ...) پتانسیل تأثیرگذاری زمین‌شناسی سطحی و شرایط ژئوتکنیکی خاک را روی حرکات قوی زمین نشان می‌دهد که اثرات ساختگاه[1] نام دارد که به‌صورت تشدید امواج زلزله و تغییر در خصوصیات عمومی امواج لرزه‌ای مانند دامنه، فرکانس و طول دوام جنبش نیرومند ظاهر می‌شود (شکل ۱). باند فرکانسی تحت تأثیر پدیده تشدید وابسته به ضخامت و سرعت امواج لایه‌های خاک است و در صورت برابری یا نزدیکی فرکانس غالب ساختگاه با فرکانس ارتعاشی سازه خسارت بسیار بزرگی به‌وجود خواهد آمد. بنابراین ارزیابی اثرات ساختگاهی به‌واسطهٔ شرایط زمین‌شناسی محلی یا توپوگرافی برای بررسی‌های ریزپهنه‌بندی و پاسخ ساختگاه ضروری است (Lermo, 1993) [۱۷].

1. Site effects

امواج زمین‌لرزه به‌طور چشم‌گیری می‌تواند به‌وسیلهٔ بخش ضخیم انسجام نیافته در رسوبات سطحی در فرکانس‌های خاص تقویت شود که نقش مهمی را در افزایش تخریب لرزه‌ای دارد (Borcherdt and Gibbs, 1976) [٦]. علت تشدید را می‌توان ناشی از به دام افتادن امواج لرزه‌ای (پیکری و سطحی) به‌علت جدایش اکوستیکی[1] میان رسوبات نرم و سنگ‌بستر دانست. در حالت تک‌بعدی به‌دلیل تداخل امواج حجمی دارای الگوی ساده و در موارد دو و سه‌بعدی به‌علت تداخل هم‌زمان امواج سطحی و پیکری پیچیده می‌شوند. تداخل امواج منجر به رخداد الگوهای تشدید با فرکانس مرتبط با ویژگی‌های هندسی و مکانیکی ساختگاه می‌شود.

$$ImR=\frac{P1V1}{P2V2}$$

$$A= 1/ImR$$



شکل ۱. اثرات ساختگاه به‌واسطهٔ ساختارهای متفاوت (توپوگرافی سطحی، ویژگی هندسی رسوبات، زمین‌لغزش، ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی، وجود حفرات و حضور آب و ...)

حرکات لرزه‌ای در هر ساختگاه به‌وسیلهٔ نوع خاک آن منطقه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رسوبات نرم‌تر و جوان‌تر حرکات زمین‌لرزه را معمولاً نسبت به رسوبات قدیمی‌تر و سنگ‌بستر تقویت می‌کند (Purnachandra Rao et al., 2011) [۲۰].

ضرورت بررسی ساختگاه کرج از منظر زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی

کرج در ۲۰ کیلومتری غرب تهران در دامنهٔ جنوبی کوه البرز واقع است. این شهر چهارمین شهر بزرگ و پر جمعیت ایران پس از تهران، مشهد و اصفهان است که مطابق نقشه خطر لرزه‌ای ایران روی مناطق مستعد خطر و فعال از نظر تکتونیکی توسعه یافته است. توسعهٔ شهر

1. Impedance Contrast

روی رسوبات آبرفتی و وجود گسل‌های فعال در اطراف شهر کرج اهمیت بررسی پاسخ خاک نرم به زلزله و اثرات ساختگاه در شهر کرج را دو چندان می‌کند.

تکتونیک کوه‌های البرز به‌وسیله هم‌گرایی بین صفحهٔ عربی و اوراسیا هم‌زمان با برپایی کوه‌زایی آلپ هیمالیا که احتمالاً از کرتاسه آغاز شده بود مشخص می‌شود.این کوه‌زایی سبب فرسایش شدید این کوه‌ها و انباشته شدن حجم عظیم نهشته‌های آبرفتی در پای ارتفاعات همراه و دارای شکستگی‌ها و گسل‌های زیادی شد. در اثر فاز کوه‌زایی لارامید (ماستریشین پایانی ـ پالئوسن) فیزیوگرافی امروز زمین شکل گرفت و محدودهٔ فرورفتگی کاسپین در شمال به خشکی تبدیل شده و موجب تشکیل جبال البرز در اوایل سنوزوئیک شد.

فاز پیرنه (ائوسن- الیگوسن) موجب گسترش وسیع توف آندزیت سازند کرج و مرتفع شدن بیش‌تر البرز با ستبرای افزون بر ۳۳۰۰ متر شد. این سازند را اولین بار ددوال (Dedual, 1967) [۷]، در پنج بخش شیل زیرین، توف میانی، شیل های آسارا، توف بالایی و شیل کندوان با سن ائوسن میانی طبقه‌بندی کرده است (Stöcklin and Setudehnia, 1971) [۲۳]. توف سبز در این سازند که در ارتفاعات شمال کرج و سایر نقاط دیده می‌شود، اصلی‌ترین اجزا در آبرفت دشت کرج است و در نتیجه به‌عنوان سنگ مادر اهمیت زیاد در شناخت و خاستگاه آبرفت کرج دارد. به‌طورکلی تشکیلات رسوبی الیگوسن در البرز مرکزی مشاهده نشده است. با ادامه جنبش‌های زمین‌ساختی رسوبات قاره‌ای کولابی سازند قرمز به سن میوسن میانی-بالایی تشکیل شد که شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سیلتستون است که به‌طور دگرشیب روی سازند کرج قرار می‌گیرد و احتمالاً معادل سازند قرمز بالایی در حوضهٔ قم است. این سازند در بخش‌های جنوب و غرب ساختگاه کرج به‌عنوان سنگ‌بستر در نظر گرفته می‌شود.

آخرین حرکات کوه‌زایی مهم البرز مربوط به فاز پاسادنین در اواخر پلیوسن یا اوایل پلئیستوسن اتفاق افتاد که منجر به گسل خوردگی‌ها، رو راندگی‌های ملایم و مرتفع شدن البرز بوده است. عملکرد این فاز کوه‌زایی به‌صورت رخساره پست تکتونیک و پیدایش تپه‌های بلند کنگلومرای پلیوسن هزاردره یا سری A شد که در اثر فرسایش آب در آن‌ها دره‌های ژرف

فراوان ایجادشده و در دامنهٔ جنوبی رشته‌کوه البرز از حوالی شاهرود تا قزوین رخنمون دارد (Rieben, 1966) [۲۱]. به‌لحاظ خصوصیات سنگ‌شناسی، سازند هزاردره متشکل از لایه‌های کنگلومرایی همگن با قلوه‌های حاصل از فرسایش کوه‌های البرز است به‌طوری‌که ۸۵ درصد قلوه‌ها متعلق به سنگ‌های سبز سازند کرج به سن ائوسن و ۱۵-۱۰ درصد آن‌ها متعلق به سنگ‌های پالئوزوئیک و مزوزوئیک است. قلوه‌ها در نزدیکی کوه عمدتاً گوشه‌دار و دارای گرد شدگی ضعیف هستند، اما با دور شدن از جبهه کوه گرد، صاف و صیقلی می‌شوند. زمینه بین دانه‌ها را ماسه و سیلت پر کرده و قلوه‌ها دارای سیمان کربناتی و آهکی هستند که باعث شده قلوه‌ها به هم جوش‌خورده و بسیار سخت شوند. دانه‌بندی این سازند در بخش‌های پائینی از انواع دانه‌ریز سیلت و مارن های گچ دار است. هم‌چنین در قسمت‌های بالایی این سازند در اثر پدیدهٔ کائولینیتی شدن یک لایه سفیدرنگ نفوذناپذیر به‌صورت پوششی بر روی آن قرار گرفته که باعث نفوذناپذیری این سازند می‌گردد (Rieben, 1966) [۲۱]. سازند هزاردره در بخش زیرین دارای تخلخل بسیار کم و مقاومت مکانیکی بسیار زیاد است که می‌تواند به‌عنوان سنگ‌بستر کرج در نظر گرفته شود و هرچه به قسمت‌های بالایی سازند نزدیک‌تر می‌شویم تخلخل زیادتر و مقاومت مکانیکی کم‌تر می‌شود و با ضربه چکش به‌آسانی از هم پاشیده می‌شود (بربریان و همکاران، ۱۳٦٤) [۱].

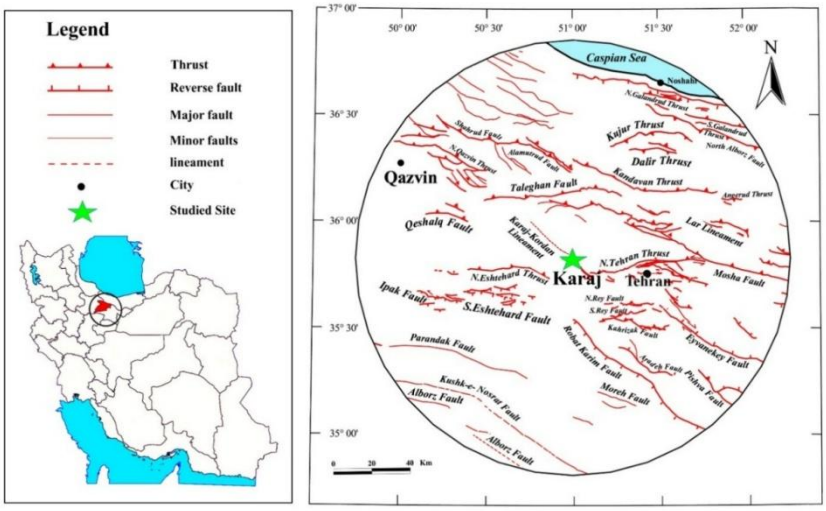
ارتفاعات البرز از زمان پلیوسن پسین تاکنون بر اثر فعالیت رودخانه‌های کردان، کرج و دیگر رودخانه‌ها و سیلاب‌های فصلی منشأ گرفته از دره‌های موجود دچار فرسایش شده و رسوبات نرم جوان آبرفتی کواترنری در دامنهٔ جنوبی کوه‌های البرز به‌وسعت ۲۱۰ کیلومترمربع به‌صورت‌های مخروط افکنه‌ای، پادگانه‌ای، نهشته‌های دشت سیلابی و بستر رودخانه‌ای نهشته شده‌اند که شهر کرج روی این رسوبات احداث شده است. در مجاورت ارتفاعات که انرژی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها زیاد بوده رسوبات درشت‌دانه شنی نهشته شده‌اند و با فاصله گرفتن از ارتفاعات و کاهش انرژی رودخانه‌ها رسوبات دانه‌ریز نهشته شده‌اند.

خصوصیات چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و سن این نهشته‌های کواترنری را اولین بار ریبن، ۱۹۵۵ به‌صورت کهریزک (B)، سازند آبرفتی تهران (C) و رسوبات عهد حاضر (D) بررسی

کرد (Rieben, 1955) [۲۱]. بربریان و همکاران، ۱۳٦٤ در گزارش خود سازند B را در دو بخش Bn یا سازند ناهمگن شمال تهران (نهشته‌های ناهمگن از جنس شن، ماسه، تخته‌سنگ و رس) و Bs سیلت و رس‌های کهریزک (جنوب تهران) مطالعه و بررسی کردند. ضخامت این سازند بسیار متنوع است اما به‌طور میانگین می‌توان ضخامت ٦۰ متر را برای آن در نظر گرفت. سازند C یا سازند آبرفتی شمال تهران روی آبرفت‌های ناهمگن شمال تهران نهشته شده است. این سازند شامل آبرفت‌های جوان مخروط افکنه‌ای است که از دامنهٔ جنوبی کوه البرز به‌سمت جنوب ادامه داشته و بخشی از دشت را در برگرفته و بخش گسترده شهر روی آن بنا شده است. ضخامت این سازند به‌طور دقیق مشخص نیست اما ریبن (۵۵-۱۹٦٦) ضخامتی حدود ٦۰ متر را برای این سازند تخمین می‌زند. این سازند در پای بلندی‌ها چهره مخروط افکنه‌ای به خود گرفته و با رسیدن به دشت جنوب تهران به لایه‌های سیلتی کم شیب تبدیل می‌شود (Tchalenko et al., 1974) [۲۵]. سازند آبرفتی D (آبرفت‌های کنونی) متشکل از جوان‌ترین نهشته‌های گستره تهران است که در بستر رودخانه‌ها، مسیل‌ها، پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌های جوان برجای گذاشته شده است. این نهشته‌ها در شمال تهران از آبرفت‌های دانه‌درشت منفصل (قلوه‌سنگ و شن گرد شده بدون سیمان) و در جنوب تهران از آبرفت‌های دانه‌ریز (سیلت و رس‌هایی با رنگ روشن) تشکیل شده است. ضخامت این لایه‌ها کاملاً محدود است به‌طوری‌که بیش‌ترین ستبرای آن از چند متر تجاوز نمی‌کند. بنابراین ارزیابی پاسخ ساختگاه و ارزیابی ریسک خطر زلزله در رسوبات جوان آبرفتی با توجه به زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی ساختگاه کرج مهم است.

فرونشستن کف دریای خزر و فرسایش بلندی‌ها و راسب شدن آن‌ها در کف حوضه خزر از یک طرف و به زیر کشیده شدن پوسته اقیانوسی خزر به زیر ایران از طرف دیگر، جنبش گسل‌های شمالی ایران را افزون می‌کند. در منطقه لرزه‌زمین‌ساختی البرز گسله‌ها، شکستگی و خطواره‌های زیادی دیده می‌شود که در شکل ۲ گسل‌های اصلی در محدودهٔ شعاع ۱۱۰ کیلومتری ساختگاه کرج نشان داده شده است. بررسی و شناخت گسل‌های کواترنری گستره تهران و البرز به‌وسیلهٔ چالنکو و همکاران، ۱۹۷٤ و بربریان و همکاران، ۱۳٦٤ انجام شده است.

بررسی‌های تاریخی و دستگاهی زلزله البرز نشان می‌دهد که بسیاری از مناطق نظیر رشت، لاهیجان، فشم، دماوند، تهران، شهرری، قزوین، آمل، بابل، بابلسر، بهشر و گرگان با رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگی ویران گشتند، بنابراین وجود گسل‌های فعال در مجاورت شهر کرج و اطراف آن، مانند کرج- کردان، ماهدشت-کرج، البرز، مشا فشم، طالقان، راندگی شمال تهران، راندگی شمال اشتهارد، شمال و جنوب ری ، کهریزک عامل تهدیدکننده برای منطقه محسوب می‌شوند و اهمیت بررسی‌های ساختگاه را دوچندان می‌کند.



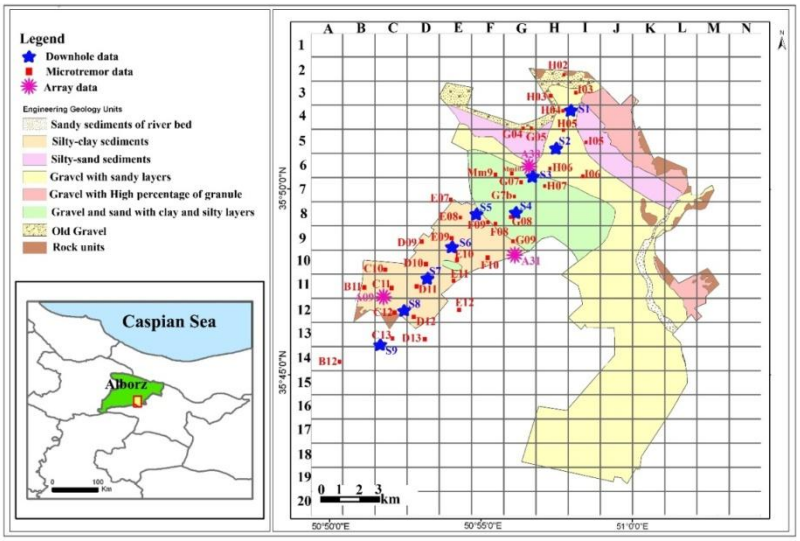
شکل ۲. نقشهٔ گسل‌های منطقهٔ بررسی شده به شعاع ۱۱۰ کیلومتری ساختگاه کرج (تاتار و همکاران، ۱۳۸۱)

برداشت داده‌های میکروترمور و مراحل پردازش

اندازه‌گیری تک ایستگاهی داده‌های میکروترمور در ساختگاه کرج در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در چند مرحله در سال ۲۰۱۲ انجام گرفته است که در پژوهش حاضر از ۳۷ داده میکروترمور در راستای پروفیل شمالی جنوب غربی استفاده کردیم زیرا در این امتداد مقطع زمین‌شناسی موجود است و به‌علاوه در کنار این ایستگاه‌ها در نه ساختگاه حاوی اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی هستند. برداشت میکروترمورها با دستگاه لرزه‌سنج سه

مؤلفه‌ای باند پهن گورالپ[1] با محدودهٔ دینامیکی ۰/۰۳۳ تا ۵۰ هرتز، رقومی کننده[2] سه‌کاناله ۲٤ بیتی انجام شده است. این دستگاه کوچک و با وزن حدود ۱/۵ کیلوگرم به‌صورت قابل حمل است و پریود طبیعی آن حدود ۱ ثانیه است.

قبل از اندازه‌گیری برای کم شدن خطای دستگاه عمل کالیبراسیون انجام می‌شود و سپس لرزه‌سنج روی سطح مورد نظر طوری تراز می‌شود که جهت شمال جغرافیایی هم‌سو با جهت شمال دسته لرزه‌سنج باشد. در بعضی موارد برای تأثیر نداشتن نویزهای محیطی مانند باد روی نگاشت میکروترمورها، دستگاه لرزه‌سنج در داخل گودال نصب می‌شود. ثبت میکروترمورها در هر ایستگاه به‌مدت پیوسته ۳۰ دقیقه با فرکانس نمونه‌برداری۱۰۰ نمونه در ثانیه انجام گرفته است. شکل ۳ موقعیت داده‌های میکروترمور را نشان می‌دهد که نزدیک ۲۱ گمانه در ۹ ساختگاه با اطلاعات درون‌چاهی است.



شکل ۳. نقشهٔ زمین‌شناسی مهندسی، موقعیت داده‌های میکروترمورها و داده‌های درون گمانه‌ای شهر کرج در بررسی حاضر

برای محاسبهٔ نسبت طیفی $\frac{H}{V}$ از نرم‌افزارGeopsy که نرم‌افزاری جامعی در خصوص پردازش میکروترمورها با در نظر گرفتن تمام جوانب است استفاده شده است (Wathelet,

1. Guralp CMG-6TD
2. Digitizer

2007) [۲۸]. این برنامه را محققان پروژهٔ اروپایی SESAME[1] برای ارزیابی پاسخ ساختگاه با استفاده از میکروترمورها تهیه کرده‌اند. در این بررسی برای تحلیل طیفی H/V از دستورالعمل توصیه‌شدهٔ محققان پروژهٔ سزامی که نتیجهٔ بررسی‌های جامع و دقیق شرکت‌کنندگان طی سه سال است استفاده شده است. مطابق این دستورالعمل در ابتدا داده‌ها باید از فرمت خروجی دستگاه لرزه‌سنج (GCF) به فرمت قابل‌قبول برنامه که فرمت SAF است تبدیل شود. بعد از حذف خطای DC Offset از فیلتر میان‌گذر در محدوده ۰/۱ تا ۵۰ هرتز نوع باترورث از مرتبه ۸ استفاده شد.

به‌منظور انتخاب پنجره‌های مانا از روش الگوریتم آنتی‌تریگر ($\frac{STA}{LTA}$) استفاده شد که نسبت میانگین دامنه‌های ارتعاشات در بازه زمانی کوچک STA[2] معادل یک ثانیه به مدت‌زمان بلندتر LTA[3] معادل سی ثانیه است. حد پایین و بالا برای $\frac{STA}{LTA}$ به‌ترتیب برابر ۰/۲ و ۲/۵ در نظر گرفته شد.

سری زمانی رکوردها به پنجره‌هایی با طول ۴۰ تا ۱۰۰ ثانیه در سه مؤلفه با هم‌پوشانی ۵۰ درصد انتخاب و از پنجرهٔ نرم‌کننده کسیینوسی[4] ۵ درصد معادل پیشنهاد گروه سزامی برای به حداقل رساندن اثرات مرزی استفاده شد. برای حذف خطای حاصل از مدوله شدن فرکانس پایین بر سیگنال می‌توان با اعمال فیلتر بالاگذر ۰/۰۵ که در نرم‌افزار بدین‌منظور تعبیه شده استفاده شود تا از ساخت فرکانس‌های کاذب نتیجه جلوگیری شود.

در مرحلهٔ بعد طیف دامنه هر پنجره انتخابی با استفاده از تبدیل فوریه سریع محاسبه شد و با استفاده روش هموارسازی کونو-اماچی، ۱۹۹۸ با عرض باند (b) ۴۰ در مقیاس لگاریتمی صاف شد. میانگین‌گیری[5] طیف دامنه دو مؤلفهٔ افقی شمالی- جنوبی و شرقی–غربی برای هر پنجره بدین‌صورت انجام می‌گیرد:

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

1. Site Effects Assessment using Ambient Excitations
2. Short term average
3. Long term average
4. Cosine taper
5. Squared average

در نهایت نسبت طیفی H/V ناکامورا برای هر پنجره و سپس میانگین گرفتن از تمامی پنجره‌ها برای به‌دست آوردن تابع بزرگ‌نمایی ساختگاه محاسبه می‌شود. وجود قله در طیف حاصل نمایانگر وجود تمایز کنتراستی (امپدانس کنتراست) بین خاک سطحی و سنگ سخت زیر است که سبب کنتراست سرعتی شارپ می‌شود (Purnachandra Rao et al., 2011) [۲۰]. بعضی توابع بزرگ‌نمایی محاسبه شده دارای یک قله واضح و مشخص یا به‌صورت دو قله‌ای بودند، درحالی‌که دیگر توابع بزرگ‌نمایی دارای پیک‌های متعدد بود که بیانگر زمین‌شناسی پیچیده منطقه است. فرکانس غالب به‌دست‌آمده در محدوده ۰/٤ تا ۲ هرتز با بزرگ‌نمایی ۱/۷ تا ۵ است (شکل ٤). مقادیر فرکانس کم حاکی از ضخامت زیاد رسوبات و وجود پی‌سنگ در عمق بیش‌تر است (Parolai et al., 2002) [۱۹].

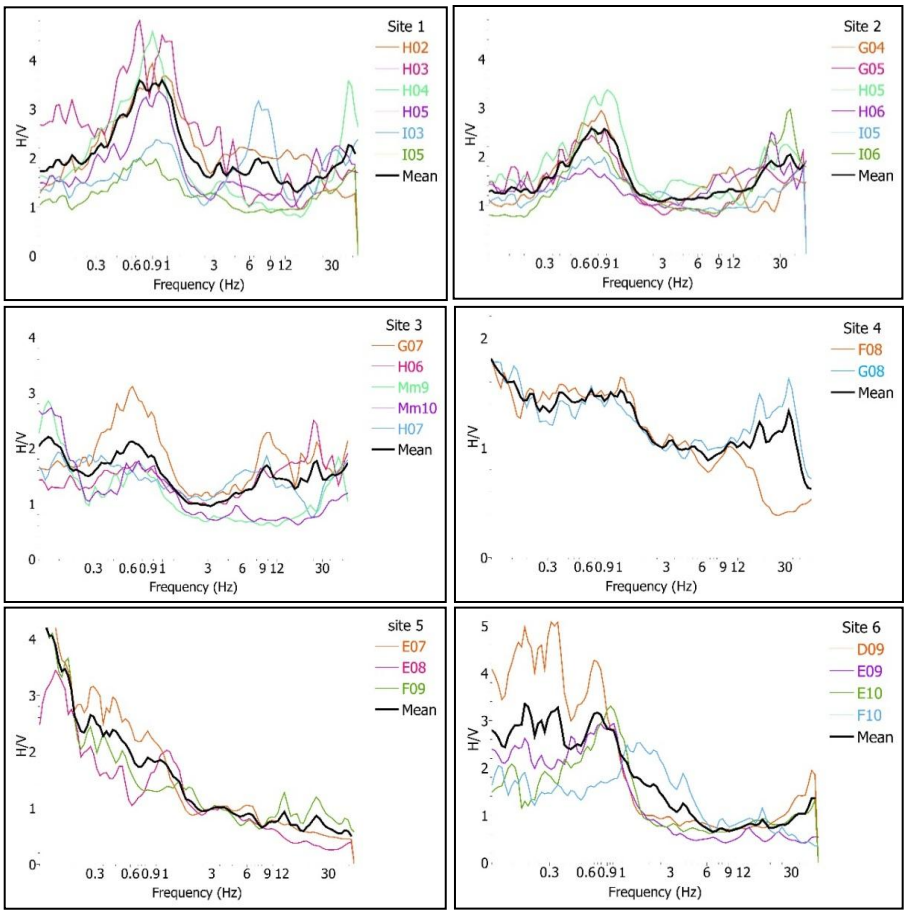
به‌طورکلی با توجه به تجربی بودن روش $\frac{H}{V}$ در ارزیابی محلی اثرات ساختگاه، دقت نظر زیاد طی جمع‌آوری داده و پردازش نیاز است. برای بالا بردن صحت نتایج حاصل از تحلیل طیفی $\frac{H}{V}$ بهره‌گیری جامع از دانش زلزله‌شناسی مهندسی به‌همراه اطلاعاتی در خصوص شرایط زمین‌شناسی محلی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی لازم است. اولین نیاز قبل از هرگونه تفسیری ارزیابی اعتبار نتایج تحلیل طیفی $\frac{H}{V}$ در کرج مطابق دستورالعمل توصیه‌شده گروه سزامی، ۲۰۰٤ است:

۱. طول پنجره (lw) : در فرکانس‌های غالب حاصل‌شده حداقل ۱۰ چرخه اصلی در هر پنجره وجود داشته باشد ($f0 > 10/lw$).

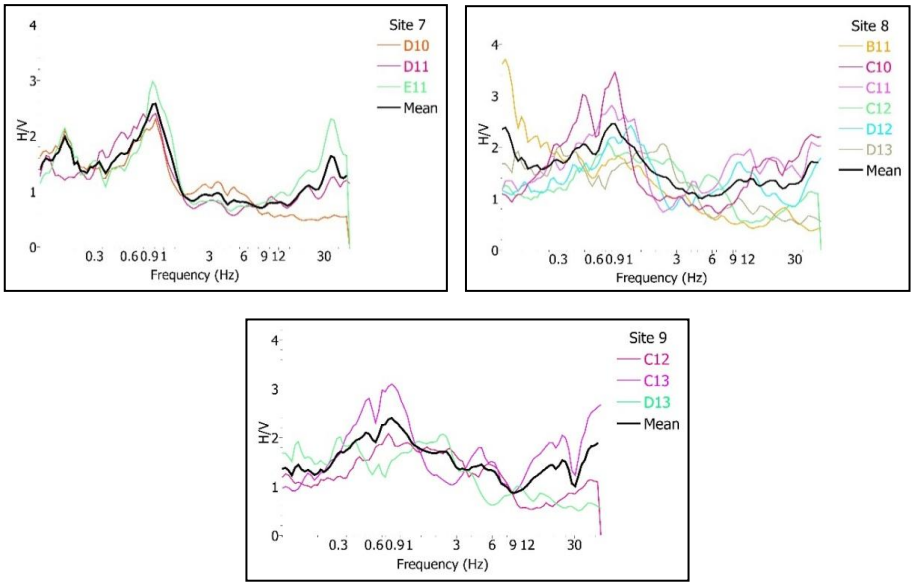
۲. میزان بالای پنجره و تعداد سیکل مورد نیاز است. بر مبنای این توصیه‌نامه هنگامی‌که از پنجره گیری خودکار با پارامترهای پیش‌فرض استفاده می‌شود تعداد کل سیکل اصلی بزرگ‌تر از ۲۰۰ شود ($nc=lw \cdot nw \cdot f0 > 200$).

۳. میزان انحراف معیار استاندارد در دامنه نسبت طیفی $\sigma A(f)$ بزرگ نباشد زیرا زیاد بودن این مقدار به این معنی است که داده‌های میکروترمور پایدار و مانا نیستند و متحمل آشفتگی شدند که روی طیف حاصل مؤثر خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که میزان $\sigma A(f)$ کم‌تر از ۲ (وقتی فرکانس بزرگ‌تر از ۰,۵ هرتز) و کم‌تر از ۳ (وقتی فرکانس کم‌تر از ۰,۵ هرتز) باشد.

بنابراین در زمانی که نتایج تحلیل طیفی رضایت‌بخش نباشند گروه سزامی پردازش مجدد نگاشت با پارامترهای پردازش دیگر را پیشنهاد می‌کنند که گاهی اوقات برای رسیدن به نتایج رضایت‌بخش برداشت مجدد میکروترمورها با طول دوام بیش‌تر و کنترل بیش‌تر شرایط نیاز است. از مجموع تحلیل طیفی روی ۳۷ داده میکروترمور، ٦ داده F08، F09، G7b، G08، H06 و H07 با شرایط ذکر شده هم‌خوانی نداشته است. یکی از دلایل طیف غیرمعتبر وجود نویز و اغتشاشات محیط است.



شکل ٤. تحلیل طیفی میکروترمورها به همراه میانگین در نه ساختگاه شهر کرج



شکل ٤.

مدل‌سازی ساختگاه

نتایج نسبت طیفی H/V مستقل از ویژگی چشمه است و تحت اثر شرایط محلی ساختار زمین‌شناسی منطقه است. بر مبنای این فرض می‌توان منحنی H/V تئوری را با شناخت از ساختار زمین‌شناسی منطقه تولید کرد (Harutoonian et al., 2010) [۱۰]. مدل‌سازی یک‌بعدی روش مناسب برای ارزیابی پاسخ ساختگاه به‌واسطهٔ زمین‌شناسی محلی است که مستلزم داشتن اطلاعات کافی از داده‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی است.

در مدل‌سازی یک‌بعدی فرض بر آن است که لایه‌های زیرسطحی به‌صورت افقی در محیط نیمه بی‌نهایت قرار دارند و امواج SH به‌صورت عمودی از سنگ‌بستر به‌طرف بالا منتشر می‌شوند (Kramer, 1996) [١٦]. وقتی در لایه‌های زیرسطحی زمین گسیختگی رخ می‌دهد، امواج زلزله در تمام مسیرها منتشر می‌شود و هنگامی‌که به مرز لایه‌های زمین‌شناسی می‌رسند منعکس و منکسر می‌شوند. از آن‌جاکه سرعت انتشار موج در لایه‌های سطحی نسبت به اعماق

کم‌تر است، امواج وقتی به لایه‌های افقی در نزدیک سطح زمین می‌رسند به‌طور معمول در جهت عمودی حرکت می‌کند.

در بررسی حاضر مدل‌سازی یک‌بعدی در راستای پروفیل بررسی شده با استفاده از نرم‌افزار Deepsoil انجام شد (Hashash et al., 2009) [۱۱]. این نرم‌افزار برنامه‌ای مناسب برای تحلیل یک‌بعدی به‌روش‌های خطی، خطی معادل و غیرخطی است و پارامترهای مختلف مانند تاریخچه زمانی استرس، استرین، طیف دامنهٔ فوریه، نسبت طیفی بزرگ‌نمایی دامنهٔ فوریه قابل محاسبه و نمایش است. با توجه به تغییر شکل‌های بسیار کوچک ایجادشده در خاک با میکروترمورها و ایجاد سطوح کرنش پایین، می‌توان از روش خطی برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای زمین به هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های خفیف استفاده کرد. در این نرم‌افزار پروفیل خاک به‌صورت مجموعه‌ای از N لایه افقی مدل می‌شود و هر لایه به‌صورت همگن و ایزوتروپ فرض شده‌اند و مشخصات هندسی، مکانیکی و دینامیکی هر لایه با ویژگی‌هایی نظیر عمق (h)، جرم مخصوص (ρ)، مدول برشی G و ضریب میرایی (β) نشان داده می‌شود. سپس با استفاده از سرعت موج برشی در هر لایه و بر اساس تئوری انتشار امواج، تشدید شتاب در سطح زمین نسبت به سنگ کف برای فرکانس‌های مختلف محاسبه و نمودار تابع انتقال به‌دست می‌آید.

از میان شتاب‌نگاشت‌های موجود در برنامه Deepsoil از شتاب‌نگاشت زلزلهٔ چی‌چی[1] تایوان استفاده شد. سپس برای کاهش دامنه و تبدیل به حرکات خفیف زمین[2]، عمل مقیاس کردن شتاب‌نگاشت تا حداکثر شتاب 0.05 g انجام شد و این حرکت تعدیل‌شده به‌عنوان حرکت لرزه‌ای سنگ‌بستر محل در نظر گرفته شد.

معمولا برای انجام مدل‌سازی سنگ‌بستر مهندسی مدنظر است که طبق تعریف محیطی است که سختی و تراکم سرعت موج برشی آن از سنگ‌بستر واقعی (زمین‌شناسی) کم‌تر است اما درعین‌حال به‌اندازه‌ای است که امواج در داخل آن تقویت نمی‌شود. سنگ‌بستر زمین‌شناسی در اعماق خیلی پائین تر از سنگ‌بستر مهندسی واقع می‌گردد و می‌توان فرض کرد که حرکت لرزه‌ای این دو مشابه هم است. بنا بر راهنمای TC4 سنگ‌بستر لرزه‌ای محیطی است که سرعت

1. Chichi
2. Weak motion

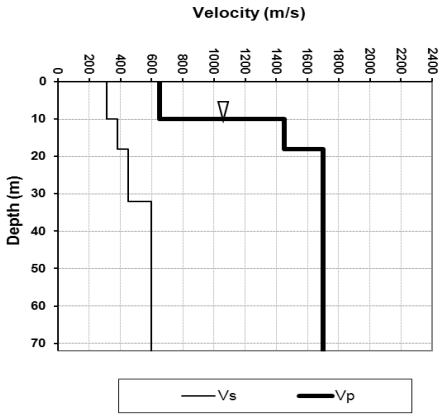
موج برشی آن بیش از ٦۰۰ متر بر ثانیه است. شایما ۱۹۷۷، بیان کرد اگر منطقه به‌صورت ساختارهای بزرگ مقیاس مانند دشت بررسی شود می‌توان از سرعت ۳۰۰۰ متر بر ثانیه به‌عنوان سنگ کف زمین‌شناسی استفاده کرد. آیین‌نامهٔ ساختمانی بین‌المللی (ICC 2000) سنگ‌بستر لرزه‌ای را با سرعت موج برشی بیش از ۷٦۰ متر بر ثانیه تعریف کرده‌اند. بر اساس آیین‌نامه ساختمانی متحد (UBC 97) سنگ‌بستر را به‌صورت ۲ گروه A (سنگ‌های خیلی سخت با سرعت بیش از ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) و گروه B (سنگ با سرعت ۷٦۰ تا ۱۵۰۰ متر بر ثانیه) تعریف کردند. بنابراین مقادیر ارائه شده سرعت موج برشی برای در نظر گرفتن سنگ‌بستر لرزه‌ای متفاوت است. از این رو، در این بررسی به‌منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت موج برشی در مدل‌سازی یک‌بعدی، سناریوسازی برای سنگ‌بستر با سه سرعت ۷٦۰ (منطبق بر تعریف سنگ‌بستر مهندسی)، ۱۳۰۰ (سنگ‌بستر زمین‌شناسی شامل ماسه‌سنگ، ماد ستون و شیل سازند قرمز بالایی) و ۲۵۰۰ متر بر ثانیه (منطبق بر پی‌سنگ منطقه شامل توف آندزیت ائوسن سازند کرج) در عمق‌های مختلف با توجه به نقشهٔ پروفیل زمین‌شناسی منطقه انجام شد. سپس نتایج مدل‌سازی عددی با توابع بزرگ‌نمایی میکروترمورها در هر سه سناریو مقایسه شد تا محدوده قابل قبولی برای عمق و سرعت موج برشی برای سنگ‌بستر پیدا شود.

مدل‌سازی یک‌بعدی ساختگاه کرج با استفاده از داده‌های درون‌چاهی برای سنگ‌بستر مهندسی با سرعت ۷٦۰ متر بر ثانیه

در این بررسی برای دست‌یابی به پروفیل سرعت موج برشی از داده‌های شرکت مهندسین مشاور ماندرو در راستای خط ٤ مترو کرج به‌طول دو کیلومتر در ۲۱ گمانه حفرشده تا حداکثر عمق ۵۰ متر در ۹ ساختگاه استفاده شد. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌علاوه در ساختگاه شمارهٔ ۸ منطبق بر گمانه A09 گمانه‌ای به‌عمق ۱۰۰ متر توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله حفر شد و در آن آزمایش درون چاهی انجام شد که پروفیل سرعت موج برشی آن در شکل ۵ آورده شده است.

مطابق آیین‌نامهٔ ساختمانی بین‌المللی (ICC 2000) اگر سنگ‌بستر لرزه‌ای (مهندسی) را با سرعت ۷٦۰ متر بر ثانیه در نظر بگیریم، سنگ‌بستر مهندسی دارای عمق۱۷ تا ۸۵

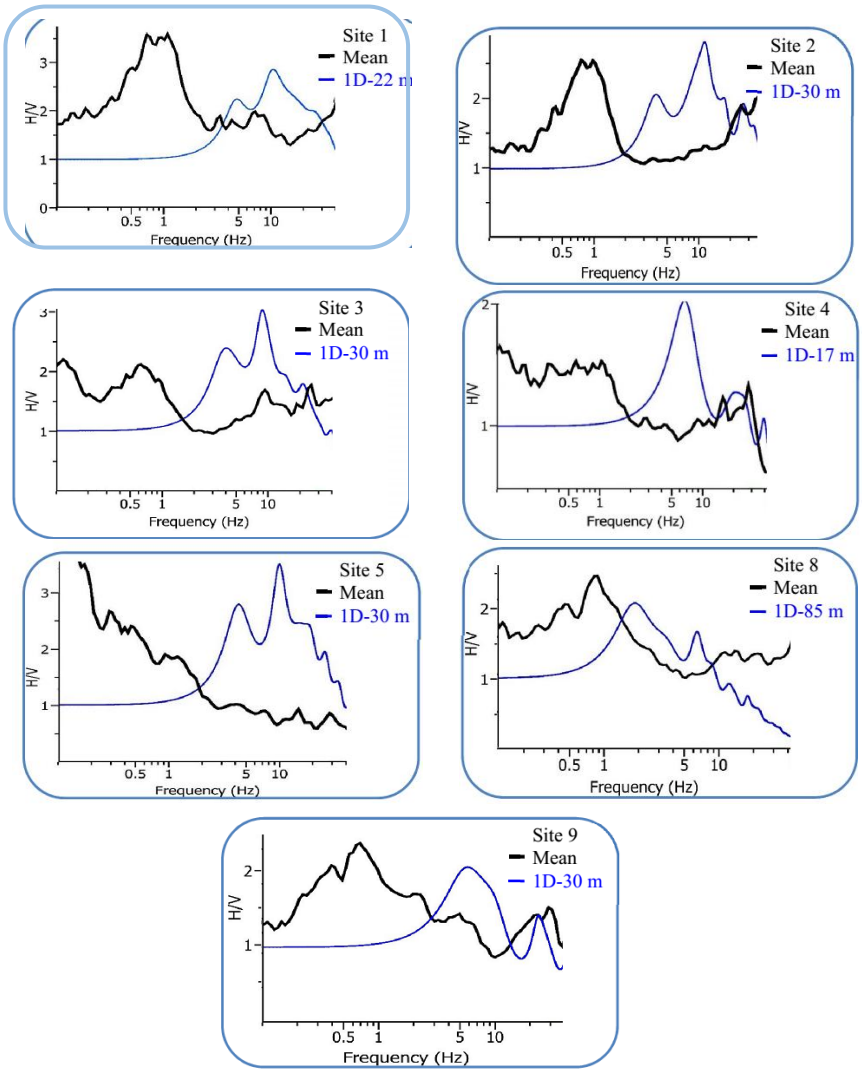
متر طبق اطلاعات سرعت موج برشی از داده‌های درون‌چاهی، است. با توجه به معلوم بودن دو پارامتر مهم ضخامت لایه‌ها و سرعت موج برشی، مدل‌سازی یک‌بعدی بر اساس داده‌های درون‌چاهی با در نظر گرفتن عمق کم آبرفت و سنگ‌بستر مهندسی با سرعت ۷۶۰ متر بر ثانیه به‌حالت الاستیک صورت گرفت که داده‌های ورودی برای تحلیل عددی در ساختگاه ۸ در جدول ۱ آورده شده است. نتایج این مدل‌سازی در هفت ساختگاه کرج در شکل ۷ آورده شده که با نتایج تحلیل طیفی میکروترمورها مطابقت ندارد و تقویت در فرکانس‌های زیادتر را نشان می‌دهد.



شکل۵. تغییرات سرعت موج فشاری و برشی در گمانه A09 ساختگاه ۸ با آزمایش‌های درون چاهی

جدول ۱. داده‌های ورودی برای مدل‌سازی عددی برای عمق آبرفت ۸۵ متر و سنگ‌بستر مهندسی با سرعت ۷۶۰ متر بر ثانیه

Thickness of layers (m)	Unit Wight (kN/m^3)	Vs (m/s)	Damp (%)
10	18	235	5
20	19.2	300	5
15	19.5	470	5
40	20	620	5
Bedrock Depth (m) =85	22	760	4



شکل ٦. مقایسه توابع بزرگ‌نمایی حاصل از میکروترمورها و مدل‌سازی یک‌بعدی با در نظر گرفتن سنگ بستر با سرعت ۷٦۰متر بر ثانیه و عمق کم آبرفت (۱۷ تا ۳۰ متر)

در برخی از بررسی‌های پیشین نیز که سرعت موج برشی برای سنگ‌بستر لرزه‌ای بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه برای تحلیل دینامیکی آبرفت و مدل‌سازی عددی تعریف شده بود، نتایج تابع بزرگ‌نمایی حاصل با تحلیل طیفی تجربی ناسازگار است:

حائری و همکاران، ۱۳۷۵ برای ریزپهنه‌بندی شهر رشت از داده‌های میکروترمور در ٥٦ نقطه شهر استفاده کردند. سپس تحلیل عددی ساختگاه را به‌روش مدل‌سازی یک‌بعدی و در نظر گرفتن سنگ کف با سرعت موج برشی ٦۰۰ متر بر ثانیه انجام دادند که نتایج تحلیل‌ها با روش تجربی هم‌خوانی نداشت.

جعفری و اصغری، ۱۳۷٦ برای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای در جنوب‌غربی تهران از داده‌های میکروترمور در ٤۰ ایستگاه استفاده کردند. سپس برای تحلیل پاسخ ساختگاه به‌روش یک‌بعدی، سنگ‌بستر لرزه‌ای را با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفتند که نتایج این تحلیل در اغلب نقاط دارای محدوده فرکانس بیش‌تر نسبت به فرکانس به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل طیفی میکروترمورها بود.

جعفری و همکاران، ۲۰۰۵ در ریزپهنه‌بندی شهر بم نیز به تطابق نداشتن توابع بزرگ‌نمایی حاصل از روش تجربی و مدل‌سازی عددی اشاره کردند.

کمالیان و همکاران، ۲۰۰۸ پاسخ غیرخطی ساختگاه قم را به‌صورت یک‌بعدی برای لایه‌های افقی، هموژن و ایزوتروپ و با در نظر گرفتن سنگ‌بستر لرزه‌ای با سرعت ۷۰۰–۸۰۰ متر بر ثانیه تحلیل کردند. هم‌چنین با تحلیل طیفی میکروترمورها در ۷۰ ایستگاه شهر، فرکانس غالب را در محدوده ۰/٦ تا ۱/۲ هرتز برآورد کردند که مبین در معرض بودن ساختمان‌های بلند (بیش از ۱٤ طبقه) است. آن‌ها یادآور شدند که منشأ این قله‌ها واضح نیست و با فرکانس حاصل از تحلیل یک‌بعدی هم‌خوانی ندارد که می‌توان آن را به اثر آبرفت عمیق یا اثرات انتشار دو و سه‌بعدی امواج در حوضه نسبت داد.

مدل‌سازی یک‌بعدی ساختگاه کرج با استفاده از داده‌های آرایه برای سنگ‌بستر با سرعت ۱۳۰۰ متر بر ثانیه

با در نظر گرفتن سنگ‌بستر لرزه‌ای با سرعت ۷٦۰ متر بر ثانیه در اعماق حدود ۱۷ تا ۸۵ متر و محاسبه تابع انتقال یک‌بعدی، شاهد بزرگ‌نمایی در فرکانس‌های بیش‌تر نسبت به میکروترمورها هستیم. با توجه به اطمینان از صحت نتایج تحلیل طیفی میکروترمورها که محققان اثبات کرده‌اند (Haghshenas ,2008) [۹]، از اختلاف نتایج در توابع بزرگ‌نمایی

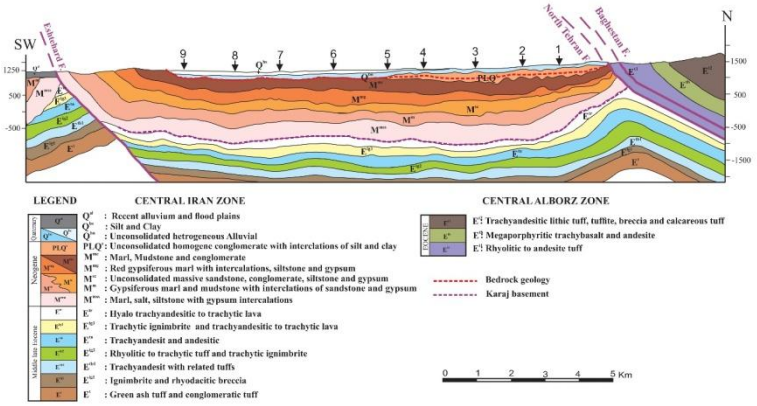
حاصل از روش تجربی و تئوری می‌توان نتیجه گرفت که دو متغیر سرعت موج برشی یا عمق سنگ‌بستر و ضخامت آبرفت به‌درستی مدل نشده‌اند.

از میان تحلیل‌های انجام شده در ساختگاه‌های مختلف مطابق شکل ٦، تنها در ساختگاه شمارهٔ ۸ شاهد تطابق نسبی بین مدل تجربی و عددی هستیم که آن به این دلیل است در این ساختگاه سنگ بستر مهندسی (سرعت ۷٦۰ متر بر ثانیه) در عمق ۸۵ متر قرار دارد. به‌نظر می‌رسد که برای رسیدن به نتیجه منطقی باید با در نظر گرفتن عمق بیش‌تر آبرفت، سنگ‌بستر زمین‌شناسی به‌عنوان مبنای تحلیل قرار گیرد و مدل‌سازی را تا رسیدن به فرکانس محدوده ۰/۷ تا ۱ هرتز با تغییر مدل سرعت لایه‌ها و سنگ‌بستر ادامه داد.

برای تحلیل و درک بهتر زمین‌شناسی در ساختگاه کرج ساختار دوبعدی منطقه در راستای پروفیل بررسی شده در نه ساختگاه با استفاده از نقشهٔ زمین‌شناسی مطابق شکل ۷ بازسازی شد. گستره ترسیم شده مربوط به دو ایالت زمین‌شناختی متمایز است. بخش‌شمالی در ایالت البرز و بخش‌جنوبی در ایالت ایران مرکزی قرار دارد. مرز این دو ایالت منطبق بر راندگی شمال تهران است که در اثر عملکرد آن بلندی‌های البرز روی دشت کرج رانده شده است. در شمال کرج توف سبز و خاکستری و سنگ‌های آذرین متنوع که به سازند کرج تعلق دارند رخنمون داشته و ارتفاعات البرز را تشکیل می‌دهد. ارتفاعات البرز در زمان زمین‌شناسی بر اثر فعالیت رودخانه کرج دچار فرسایش شده و به‌صورت مخروط افکنه بزرگ نهشته شده‌اند. در مجاورت ارتفاعات که انرژی رودخانه‌ها و آبراهه‌ها زیاد است رسوبات درشت‌دانه شنی نهشته شده‌اند (ساختگاه ۱ تا ٤) و با فاصله گرفتن از ارتفاعات و کاهش انرژی رودخانه‌ها رسوبات دانه‌ریز نهشته شده‌اند (ساختگاه ۵ تا ۹). بربریان و همکاران، ۱۳٦٤ در گزارش خود سازند B را در دو بخش Qbn یا سازند ناهمگن شمال تهران (نهشته‌های ناهمگن از جنس شن، ماسه، تخته‌سنگ و رس) و Q Bs سیلت و رس‌های کهریزک (جنوب تهران) مطالعه و بررسی کردند. ضخامت این لایه مطابق مدل‌سازی یک‌بعدی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر است که روی سنگ‌بستر نهشته شده‌اند. لایه‌های قرمز بالایی با ناپیوستگی روی پی‌سنگ کرج(توف آندزیت) نهشته شدند. بنا بر مقاله چالنکو و همکاران، ۱۹۷٤ سنگ کف منطقه در دشت آبرفتی کرج از ته‌نشین‌های بخش زیرین سازند هزار دره به سن پلیوسن (با علامت PLQ در نقشه) و سازند

قرمز بالایی (مارن، آهک مارنی، گچ و نمک) به سن میوسن (با علامت M) تشکیل شده است.

شفیعی و آزادی، ۲۰۰۶ سرعت موج برشی را در گستره تهران متناسب با زمین‌شناسی منطقه محاسبه کرد (جدول ۲). بنابراین میانگین سرعت ۱۳۰۰ متر بر ثانیه به‌عنوان سنگ‌بستر زمین‌شناسی منطقه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد.



شکل ۷. ساختار دو بعدی زمین شناسی منطقه (برگرفته از نقشهٔ زمین‌شناسی کرج با تغییرات)

جدول ۲. مقادیر سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده برای واحدهای سنگی در گستره تهران

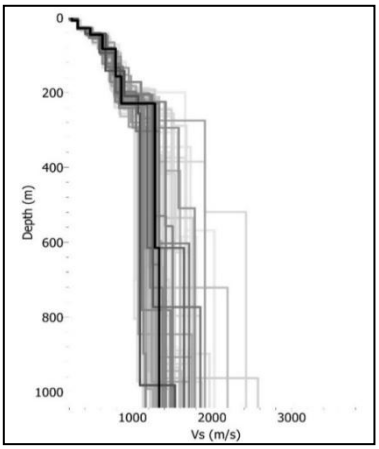
NEHRP site classification	$\overline{V}_s(30)$ (m/s)	Type of material	Zone
A	1600	Dolomite	Eastern and southern mountains
B	1400	Limestone	
B	1200	Marly limestone	
A	2500	Basalts	Northern mountains
A	2000	Andesites and pyroclastics	
B	1300	Shales and tuffs	

به‌منظور دسترسی به پروفیل سرعت موج برشی در اعماق بیش‌تر، ایستگاه‌های آرایه میکروترمور با ۷ لرزه‌سنج با شعاع ۱۰۰ متر در نقطه A09 منطبق بر ساختگاه شمارهٔ ۸ طراحی شد که پروفیل سرعت موج برشی بر اساس اطلاعات آرایه در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به این شکل در مرز حدود ۲۳۰ متر شاهد یک کنتراست مشخص هستیم. بنابراین مدل‌سازی در ساختگاه ۸ برای آبرفت به ضخامت ۲۳۰ متر روی سنگ‌بستر با ۱۳۰۰ متر بر ثانیه متناسب با سنگ‌شناسی منطقه مطابق جدول ۳ صورت گرفت. نتیجه این مدل‌سازی دارای

محدودهٔ فرکانسی ۰/۸۷ هرتز متناسب با قله میکروترمور در این ساختگاه است. داده‌های ورودی برای این مدل‌سازی و نتایج آن در جدول ۲ و شکل ٦ آورده شده است. در دیگر نقاط مدل‌سازی با استفاده از ترکیب اطلاعات آرایه و درون‌چاهی موجود انجام گرفت. نتایج این مدل‌سازی در ۹ ساختگاه نشان می‌دهد که اولین کنتراست مؤثر میکروترمورها در عمق ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر وجود دارد (شکل ۹).

جدول ۳. داده‌های ورودی برای مدل‌سازی عددی ساختگاه ۸ برای عمق آبرفت ۲۳۰ متر و سنگ بستر زمین‌شناسی با سرعت ۱۳۰۰ متر بر ثانیه

Thickness of layers (m)	Unit Wight (kN/m^3)	Vs (m/s)	Damp (%)
10	18	235	5
20	19.2	300	5
15	19.5	470	5
40	20	620	5
75	21	786	4
70	21	860	4
Bedrock Depth (m) =230	22	1300	1

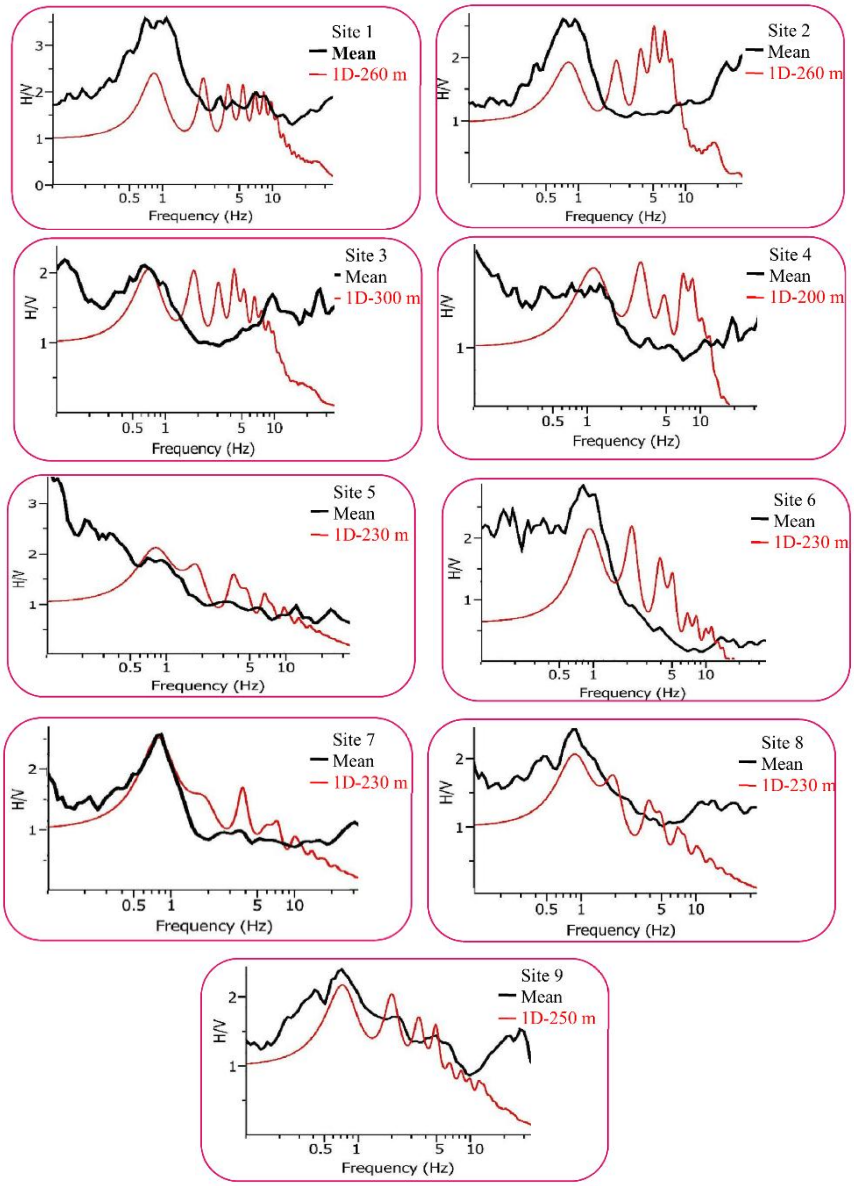


شکل ۸. پروفیل سرعت موج برشی در گمانه A09 در ساختگاه ۸

مدل‌سازی یک‌بعدی ساختگاه کرج با استفاده از روش آزمون و خطا برای سنگ‌بستر با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه

با توجه به شکل ۹ و نتایج مدل‌سازی با استفاده از داده‌های آرایه بدیهی است که اولین کنتراست مؤثر در میکروترمورها از عمق ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر ناشی می‌شود، بااین‌حال وجود دیگر پیک‌های فرکانس پایین یا به دلیل شکل هندسی حوضه رسوبی است یا حکایت از وجود کنتراست عمیق می‌دهد که از زمین‌شناسی منطقه و اختلاف در سنگ‌بستر ناشی می‌شود. به نظر می‌رسد که با توجه به زمین‌شناسی منطقه، سازند کرج به‌عنوان پی‌سنگ نقش مهمی را به‌عنوان لایهٔ تعیین‌کننده بازی می‌کند. بنابراین برای به‌دست آوردن مدل بهتر کنتراست عمیق در ۲ کیلومتری زمین به‌واسطهٔ اختلاف در نوع جنس سنگ‌بستر در نظر گرفته شد. با توجه به پروفیل زمین‌شناسی منطقه در شکل ۷، سازند قرمز بالایی روی تراکی آندزیت تا گدازه‌های

تراکیتی ائوسن پسین واقع شده است که میانگین سرعت موج برشی در آن۲۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه است (جدول ۲).



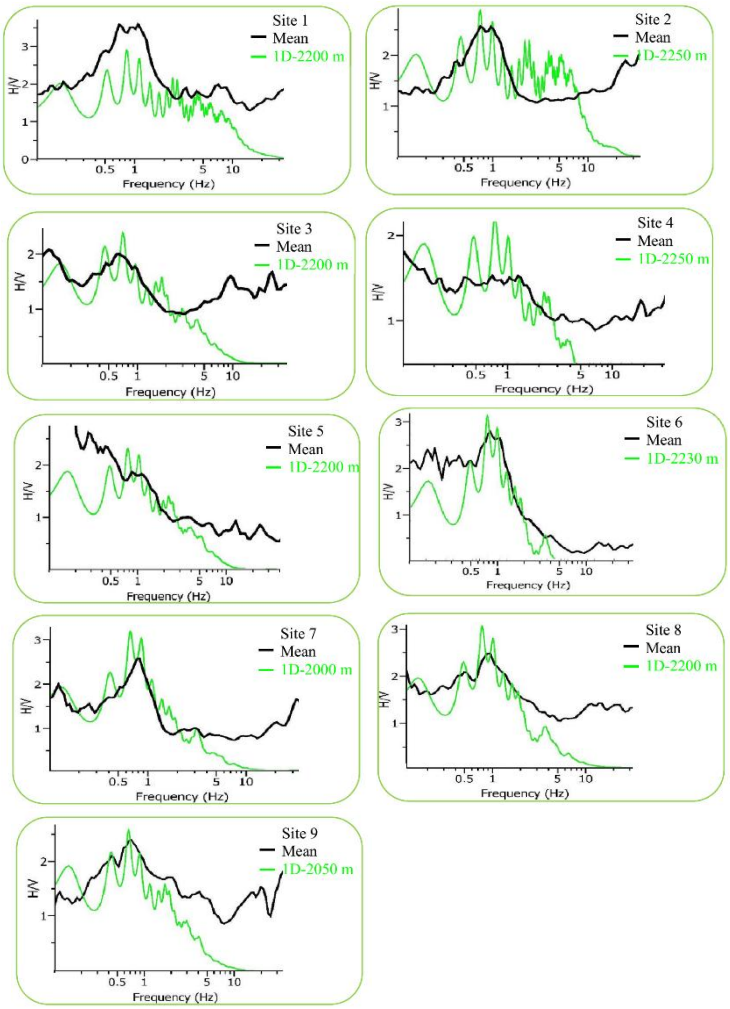
شکل ۹. مقایسهٔ توابع بزرگ‌نمایی حاصل از میکروترمورها و مدل‌سازی یک‌بعدی با در نظر گرفتن سنگ بستر با سرعت ۱۳۰۰ متر بر ثانیه در عمق ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر

در مدل‌سازی حاضر از سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه به‌عنوان سرعت موج برشی در پی‌سنگ کرج استفاده شده است. به این منظور با توجه به خصوصیات سنگ‌شناسی سازند قرمز بالایی، در مدل‌سازی میانگین سرعتی ۱٤۰۰ متر بر ثانیه به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد و با تغییر ضخامت این لایه، مدل‌سازی به‌روش آزمون و خطا تا پی‌سنگ ادامه یافت تا مدل به‌دست‌آمده با قله‌های میکروترمور منطبق شود. به‌عبارت دیگر برای این مدل سازی عددی از تلفیق ۳ داده درون چاهی، آرایه‌ای و زمین‌شناسی منطقه استفاده شده است که داده‌های ورودی برای این تحلیل در ساختگاه ۸ برای آبرفت عمیق با ضخامت ۲۲۰۰ متر روی پی سنگ با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه در جدول ٤ آورده شده است. مقایسهٔ مدل‌سازی عددی و تجربی در ۹ ساختگاه کرج در شکل ۱۰ آورده شده است. نتیجهٔ این مدل‌سازی حاکی از وجود پی‌سنگ در محدودهٔ عمق ۲۰۰۰ تا ۲۲۵۰ متر دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

استفاده از روش تجربی بر اساس میکروترمورها روشی کارآمد در تخمین اثرات ساختگاهی در کرج است هرچند که استفاده از نگاشت زلزله در صورت وجود می‌توانست شواهد بهتری از عمق و هندسه پی‌سنگ ارائه کند. مدل‌سازی یک‌بعدی پروفیل‌های سرعت موج برشی حاصل از داده‌های لرزه‌نگاری درون‌چاهی (لایه‌های سطحی آبرفت به ضخامت ۱۷ تا ۸۵ متر روی سنگ‌بستر مهندسی با سرعت ۷٦۰ متر بر ثانیه) نمی‌تواند فرکانس اصلی لایه‌های آبرفت را تخمین بزند.

با در نظر گرفتن سنگ‌بستر زمین‌شناسی (لایه‌هایی با سرعت ۱۳۰۰متر بر ثانیه) در مدل‌سازی عددی، فرکانس تشدید تابع بزرگ‌نمایی در محدودهٔ ۱ هرتز به‌دست آمد که علاوه بر تطابق با نمودارهای نسبت طیفی H/V ، آبرفت نسبتاً عمیق برای شهر کرج به ضخامت ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر محاسبه شده است. به‌نظر می‌رسد که پی‌سنگ کرج به سن ائوسن (با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه) نقش مهم در تولید قله‌های فرکانس‌های اندک در نمودار تابع بزرگ‌نمایی داشته باشد.



شکل ۱۰. مقایسهٔ توابع بزرگ‌نمایی حاصل از میکروترمورها و مدل‌سازی یک‌بعدی با در نظر گرفتن پی سنگ با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه در عمق ۲۰۲۰ تا ۲۲۵۰ متر

جدول ٤. داده‌های ورودی برای مدل‌سازی عددی ساختگاه ۸ برای آبرفت عمیق به ضخامت ۲۲۰۰ متر و پی سنگ با سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه

Thickness of layers (m)	Unit Wight (kN/m^3)	Vs (m/s)	Damp (٪)
۱۰	۱۸	۲۳۵	۵
۲۰	۱۹/۲	۳۰۰	۵
۱۵	۱۹/۵	٤۷۰	۵
٤۰	۲۰	٦۲۰	۵
۷۵	۲۱	۷۸٦	٤
۷۰	۲۱	۸٦۰	٤
۱۹۷۰	۲۲	۱٤۰۰	۳
Bedrock Depth (m)=۲۲۰۰	۲۵	۲۵۰۰	۱

منابع

۱. بربریان م.، قریشی م.، ارژنگ روش ب.، مهاجر اشجعی ا.، *پژوهش و بررسی ژرف نو زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون*، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ٥٦ (١٣٦٤) ٣١٦.

۲. تاتار م.، حمزه‌لو ح.، اسلامی ا.، *مطالعات برآورد خطر و ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاه ساختمان مرکزی صنعت نفت*، پروژه صندوق بازنشستگی صنعت نفت، جلد اول (۱۳۸۱).

۳. حائری م.، گتمیری ب.، ثقفی زنجانی م.، *ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای مناطق شهری*، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (۱۳۷۵).

٤. جعفری م.ک.، اصغری ا.، *ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای جنوب غربی تهران از دیدگاه تأثیرات ساختگاهی*، جلد ۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (١٣٧٦).

5. Bard P. Y. "Lecture Notes on Seismology, Seismic Hazard Assessment and Risk Mitigation", International Training Course, Potsdam (2000) 160.

6. Borcherdt R. D., Gibbs J. F. "Effects of local geological conditions in the San Francisco bay region on ground motions and the intensities of the

1906 earthquake", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 66 (1976) 467-500.

7. Dedual E. "Zur Geologic des mittleren und unteren Karaj-Tales, Zentral-Elburz (Iran)", Mitt. Geol. Inst ETH u. Univ. Zurich, n.s., 76 (1967) 123.
8. Field E. H., Jacob K. H. "The Theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise", Geophysic Research Letters, Vol. 20-24 (1993) 2925-292.
9. Haghshenas E., Bard P. Y., Theodulidis N., SESAME WP04 Team (2008), "Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio,Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 6 (1993) 75-108.
10. Harutoonian P., Chapman B., Leo C. J., Liyanapathirana S., "Characterisation of an urban site by ambient noise HVSR method: resonance frequencies and site amplifications", GeoFlorida 2010, Advances in Analysis, Modeling & Design, Vol. 199 (2010) 1152-1161.
11. Hashash Y.M.A., Groholski D. R., Phillips C. A., Park D. "Deepsoil V5.0, User Manual and Tutorial", University of Illinoist at Urbana-Champaign(2009).
12. ICC 2000, "International building code", International Code Council. (n.d.).
13. Jafari M. K., Ghayamghamian M. R., Davoodi M., Kamalian M., Sohrabi-Bidar A., "Site effects of the 2003 Bam, Iran Earthquake", Earthquake Spectra, Vol. 21(S1) (2005) 125-136.
14. Kamalian M., Jafari M. K., Ghayamghamian M. R., Shafiee A., Hamzehloo H., Haghshenas E., Sohrabi-bidar A., "Site effect microzonation of Qom, Iran", Engineering Geology, Vol. 97 (2008) 63-79.

15. Konno K., Omachi T., "Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 88 (1998) 228-241.
16. Kramer S. L. "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall (1996) 653.
17. Lermo J., Chavez-Garcia F. J. "Site effect evaluation using spectral ratio with only one station", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 83 (1993) 1574-1594.
18. Nakamura Y., "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quaterly Report of the Railway Technical Research Institue, Vol. 30, No. 1 (1989) 25-30.
19. Parolai S., Bormann P., Milkereit C., "New relationships between Vs thickness of sediments, and resonance frequency calculated by H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 92 (2002) 2521-2526.
20. Purnachandra Rao N., Ravi Kumar M., Seshunarayana T., Shukla A. K., Suresh G., Pandey Y., Dharma Raju R., Pimprikar S. D., Chandra 19, Das, Kalpna Gahalaut, Mishra P. S., Harsh Gupta "Site amplification studies towards seismic microzonation in Jabalpur urban area", central India, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 36 (2011) 1247-1258.
21. Rieben E. H., "Geological Observations on Alluvial Deposits in Northern Iran", Geological Survey of Iran, Report No.9 (1966).
22. Rieben E. H., "The geology of the Tehran plain", American Journal of Science, Vol. 253 (1955) 617-639.

23. Stöcklin J., A. Setudehnia, "Stratigraphic lexicon of Iran. Part 1: central, north and east Iran", Geological Survey of Iran, Report no. 18 (1971) 376.
24. SESAME, "Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations Measurements", Processing And Interpretation (2004) 62.
25. Tchalenko J. S., Berberian M., Iranmanesh H., Bailly M., Arsovsky M., "Tectonic framework of Tehran region, geological survey of Iran", Report No. 29 (1974) 7-46.
26. "Technical Committee for Earthquake Geotechnical Eng", (TC4) Revised Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng (1999).
27. ICBO, "Uniform building code, International Council of Building Officials" (1997).
28. Wathelet M., "Geopsy Online Documentation", www.geopsy.org (2007).