

## بررسی اثر آبرفت‌های عمیق بر پاسخ لرزه‌ای یک‌بعدی در شهر قم

عبداله سهرابی‌بیدار<sup>۱\*</sup> و لیلا جاسم‌پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۸/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۴/۱۱)

### چکیده

امروزه در بسیاری از تحلیل‌های دینامیکی آبرفت، اثرات لایه‌های نرم سطحی قرار گرفته روی سنگ بستر لرزه‌ای (سرعت موج بُرشی بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه) مدنظر قرار می‌گیرد. نتایج چنین تحلیل‌هایی بعضاً با نتایج حاصل از بررسی‌های تجربی مبتنی بر ثبت خردلرزه یا جنبش‌های ضعیف زمین ناسازگار است. در این پژوهش اثرات ساختمانی آبرفت‌های عمیق شهر قم مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور تعیین ویژگی‌های هندسی و ضخامت لایه‌های آبرفت‌های عمیق از بررسی‌های مقاومت‌سنجی صورت گرفته در دشت قم استفاده شده و مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک براساس توصیف زمین‌شناسی تعیین شده و سه مدل سرعت کم، متوسط و زیاد برای لایه‌های آبرفت و سنگ بستر مدنظر قرار گرفته است. منحنی‌های بزرگ‌نمایی به‌ازای ویژگی‌های دینامیکی متفاوت لایه‌های آبرفت و سنگ بستر محاسبه و نتایج با بزرگ‌نمایی حاصل از داده‌های خردلرزه مقایسه شده است. در همه مدل‌های گوناگون سرعت کم، متوسط و زیاد، بزرگ‌نمایی مشخصی در محدوده بسامدهای کمتر از ۱ هرتز به‌دست آمده است. علاوه بر این سازگاری بسیار مناسبی بین بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های عددی حاضر در وضعیت مدل سرعت موج بُرشی زیاد و بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های تجربی پیشین مشاهده می‌شود. وجود بزرگ‌نمایی در این محدوده بسامدی و سازگاری نسبی آن با نتایج تحقیقات خردلرزه حاکی از اثرگذاری آبرفت‌های عمیق در تابع‌های بزرگ‌نمایی ساختمانی است و این مسئله ضرورت توجه به وضعیت شکل حوضه رسوبی با در نظر گرفتن اثرات آبرفت‌های عمیق در بررسی آثار ساختمانی به روش عددی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شهر قم، سنگ بستر، اثرات ساختمانی، تحلیل عددی، بزرگ‌نمایی، خردلرزه

## Deep alluvial effects on one-dimensional seismic site response in Qom city

Sohrabi-Bidar, A.<sup>1</sup> and Jasempur, L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, School of Geology, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>M.Sc. Student, School of Geology, University of Tehran, Iran

(Received: 10 Nov 2012, Accepted: 02 Jul 2013)

### Summary

Nowadays in many site response analyses of alluvial, environment with shear wave velocity  $600 \text{ m/sec} < v_s < 800 \text{ m/sec}$  is considered as the seismic bedrock. Results of these analyses did not confirm those from empirical analyses based on the recording of microtremors or weak earthquake motions. Recently, effects of deep alluviums and contrast between geologic bedrock and alluviums are considered as a possible cause for this inconformity. This study examines the site effects of deep alluviums of Qom city. Qom is located at the northern margin of central Iran zone and on the Quaternary young alluviums. Based on the geoelectrical resistivity surveys, thickness of alluviums in some parts of the city is greater than 250m. Earlier empirical studies based on the recording of microtremors had shown that at the frequencies ranging from 0.6 to 1.2 Hz, a clear amplification can be seen in the studied alluviums. Amplification at these frequencies did

not confirm results from one-dimensional numerical analysis of the soft sediments on the conventional seismic bedrock. At the current study, in order to determine the geometrical properties and thickness of deep alluviums, resistivity surveys have been conducted in Qom plain was used and dynamic properties of the soil layers were determined by geological descriptions. Considering the uncertainty resulting from the lack of dynamic properties of soil layers, a parametric study was conducted and three models of low, medium and high velocity were considered for alluvial layers and bedrock. One-dimensional numerical analysis was carried out using the software Deepsoil. As the results will be compared with those from empirical analysis of small strain displacements of microtremors, a linear elastic behaviour was assumed. Amplification curves were measured using different dynamic properties of alluvial layers and the bedrock and the results were compared with those from amplification of microtremors. In all analyses conducted using different dynamical properties (three models of low, medium and high velocity), a specific amplification at the frequencies less than 1 Hz was obtained. Furthermore, amplified frequency resulted from previous empirical studies corresponds with the amplified frequency resulted from numerical analysis with high velocity model. Amplification at this frequency range and its correspondence with results of microtremors studies shows the effects of deep alluviums on the site amplification functions. The importance of deep alluviums insists on attention to the shape of the sedimentary basin and consideration of the effects of deep alluviums on the numerical site effects studies. In the case of inadequate information about the deep alluviums, it is necessary to use empirical analysis recorded motion at the site such as microtremors or weak earthquake motions. At present, consideration of site effects in most of building codes for design earthquake resistant structures are limited to effects of shallow alluviums, however, as discussed in this paper, deep alluviums are effective on site amplification specially in low frequencies and it is necessary to take them into account in the design of tall structures.

**Keywords:** City of Qom, Seismic bedrock, Site effects, Numerical analysis, Amplification, Microtremors

## ۱ مقدمه

(۱۳۸۱) و مشهد (حافظی مقدس، ۱۳۸۶) تحقیقات ریزپهنه‌بندی خطر لرزه‌ای به انجام رسیده و یا در دست انجام است. این مسئله به‌خصوص با در دسترس بودن برنامه‌های رایانه‌ای کارآمد تحلیل عددی پاسخ دینامیکی آبرفت نظیر SHAKE (اشنابل و همکاران، ۱۹۷۲؛ ادريس و سان، ۱۹۹۲) یا سایر برنامه‌های با روش شناسی مشابه آن (ایجوپرو، ۲۰۰۰؛ باردت و همکاران، ۲۰۰۰؛ باردت و توییتا، ۲۰۰۱) توسعه بیشتری یافته است.

در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با آثار ساختگاهی براساس تحلیل عددی آبرفت، بخشی از لایه‌های زیرزمینی مدنظر قرار می‌گیرد که سبب تقویت حرکت لرزه‌ای شود. این بخش از لایه‌های زیرزمینی روی لایه‌ای با

تأثیرات زمین‌شناسی سطحی بر حرکت لرزه‌ای، قابل قبول و شناخته شده است و این آثار را می‌توان عاملی مهم در جنبش ناشی از زمین‌لرزه قلمداد کرد. بررسی شدت و پراکندگی خرابی‌های زلزله‌های دهه‌های اخیر، اهمیت اثرات ساختگاهی و شرایط زمین‌شناسی سطحی را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است (بارد، ۱۹۹۷). اکثر زمین‌لرزه‌های مخرب اخیر در ایران و سایر کشورهای جهان نیز شواهدی از اهمیت بسیار زیاد اثرات ساختگاهی در بر داشته‌اند. در نظر گرفتن اثرات ساختگاهی در تهیه نقشه‌های کاربری زمین یکی از اهداف برنامه‌های کاهش خطرات زمین‌لرزه است و با در نظر گرفتن چنین هدفی در بسیاری از شهرهای بزرگ کشور نظیر تهران (جعفری،

شده بود (جعفری، ۱۳۸۱). در بررسی ریزپهنه‌بندی شهر بم نیز نبود هم‌خوانی کامل نتایج حاصل از تحقیقات تجربی مبتنی بر خردلرزه و جنبش ضعیف زمین با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی یک‌بعدی دیده شده است (جعفری و همکاران، ۲۰۰۵). اخیراً کمالیان و همکاران (۲۰۰۸)، به ناسازگاری موجود بین بزرگ‌نمایی حاصل از تحقیقات تجربی به روش خردلرزه و بزرگ‌نمایی حاصل از تحلیل‌های عددی در محدوده شهر قم اشاره کرده و اثر آبرفت‌های عمیق و یا اثرات انتشار دو‌بعدی را به‌منزله عوامل این ناسازگاری پیشنهاد کرده‌اند. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی اثرات ساختگاهی ناشی از آبرفت‌های عمیق شهر قم است. در این تحقیق به‌جای سنگ بستر لرزه‌ای مرسوم تعریف شده براساس سرعت موج برشی، ضخامت کل لایه‌های آبرفتی مدنظر قرار می‌گیرد و از سنگ بستر زمین‌شناسی استفاده خواهد شد.

## ۲ ویژگی‌های هندسه حوضه رسوبی و زمین‌شناسی

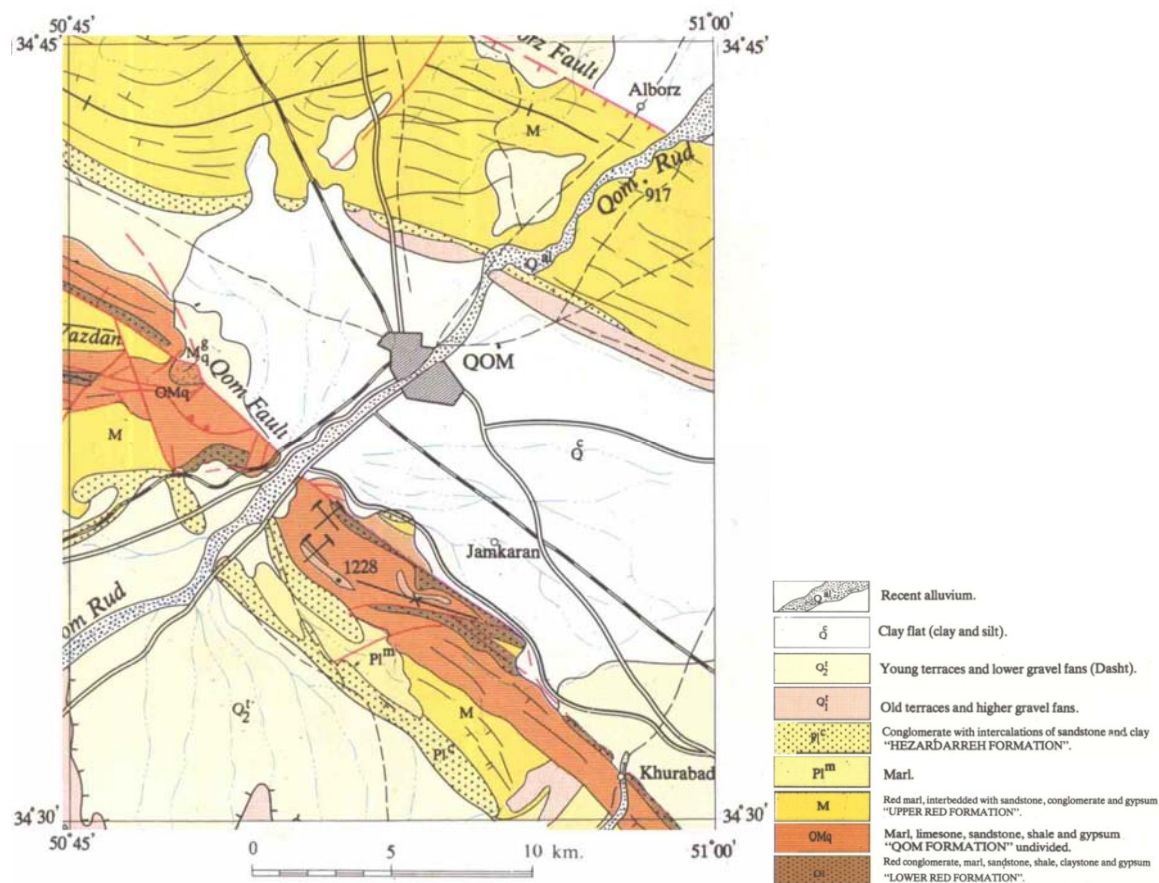
### آبرفت‌های کواترنر شهر قم

محدوده مورد بررسی از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در شمال زون ایران مرکزی و در حاشیه جنوبی زون البرز واقع شده است. قدیمی‌ترین رخنمون از سنگ‌ها در ناحیه قم، به دوره ائوسن تعلق دارد که به‌صورت بخشی از نوار آتشفشانی ارومیه-بزمان است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی، برگرفته از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ ورقه قم، را نشان می‌دهد. در اواخر ائوسن و اوایل اولیگوسن، جنبش‌های زمین‌ساختی با پس‌روی دریا و پیدایش رژیم کولابی تا تبخیری همراه بوده که نتیجه آن ایجاد سازند سرخ پایینی است. در اولیگو-میوسن، پیش‌روی دریا در ایران مرکزی سبب ایجاد رخساره دریایی سازند قم، با نهشته‌های اساساً آهکی و ماری شده است. در اواخر میوسن زیرین، رسوبات بستر قاره‌ای-کولابی سازند سرخ بالایی، به‌طور هم‌شیب و

ویژگی‌های مقاومتی زیاد قرار دارد که امواج ناشی از زلزله در آن تقویت نمی‌شود. این لایه سنگ بستر لرزه‌ای نامیده می‌شود. سنگ بستر لرزه‌ای در حال حاضر عموماً براساس سرعت موج برشی تعریف می‌شود. توصیه ایشیهارا و آنسال (۱۹۸۲)، در ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای منطقه بالکان، انتخاب سنگ بستر لرزه‌ای با سرعت موج برشی بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه بوده است. بوچرت (۱۹۹۴) سرعت موج برشی ۷۰۰ متر بر ثانیه را برای سنگ کف لرزه‌ای پیشنهاد کرده است. بر اساس راهنمای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک (۱۹۹۹)، سنگ بستر لرزه‌ای محیطی است که سرعت موج برشی آن بیش از ۶۰۰ متر بر ثانیه باشد. دبری و همکاران (۲۰۰۰)، سید و همکاران (۲۰۰۱) و آئین‌نامه‌های شناخته شده ایالات متحده نظیر آئین‌نامه ساختمانی متحد (۱۹۹۷)، آئین‌نامه ساختمانی بین‌المللی (۲۰۰۰) و آئین‌نامه برنامه ملی کاهش خطرات لرزه‌ای (۲۰۰۳) نیز سنگ بستر لرزه‌ای را محیطی تعریف کرده‌اند که سرعت موج برشی آن بیشتر از ۷۶۰ متر بر ثانیه است. در ویرایش سوم آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (۱۳۸۴) محیطی سنگ بستر لرزه‌ای معرفی شده است که سرعت موج برشی آن بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه باشد. وجود برخی ناسازگاری‌های مشاهده شده بین تابع‌های بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های عددی و بررسی‌های تجربی باعث تشکیک در صحت تعریف سنگ بستر لرزه‌ای به‌صورت فوق شده است. در بسیاری از ساختگاه‌های آبرفتی بزرگ‌نمایی قابل‌توجهی در بسامدهای کم، مشاهده شده است که با ویژگی‌های لایه‌های سطحی، و اثرات ساختگاهی ناشی از آنها قابل‌توجه نیست. پیش از این، چنین ناسازگاری‌هایی بین بزرگ‌نمایی حاصل از تحقیقات تجربی به روش خردلرزه و بزرگ‌نمایی حاصل از تحلیل‌های عددی متکی بر لایه‌های سطحی خاک در محدوده شهر تهران مشاهده

ژئوفیزیکی تحقیقات دشت قم، استفاده شده است. این تحقیقات که به منظور بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، تفکیک و بررسی لایه‌های زمین و برآورد ضخامت لایه‌ها، همچنین شناسایی و تعیین موقعیت ذخایر سفره‌های آب زیرزمینی در محدوده دشت قم صورت گرفته، با استفاده از روش مقاومت‌سنجی الکتریکی به انجام رسیده است (شرکت زمین کاو گستر، ۱۳۸۷). عملیات مقاومت‌سنجی الکتریکی در محدوده دشت قم، با برداشت ۴۸۷ سونداژ الکتریکی با آرایه الکترودی شلومبرگر و در امتداد ۳۳ نیم‌رخ صورت گرفته است.

پیوسته، جانشین رخساره‌های دریایی قم شده است. سرانجام رسوبات ذکر شده طی فاز پاسادین، چین‌خورده‌اند و سبب ایجاد دگرشیبی در پی رسوبات کواترنری در سراسر منطقه شده‌اند (آقاباتی، ۱۳۸۳). روی این سازندها، رسوبات مربوط به کواترنر قرار گرفته است. نهشته‌های دوران چهارم منطقه، شامل نهشته‌های مخروط افکنه‌ای، رسوبات پادگانه‌ای قدیم و جدید و نهشته‌های دشت‌های سیلابی و بستر رودخانه‌ها است. برای بررسی ویژگی‌های شکل حوضه رسوبی و زمین‌شناسی آبرفت‌های کواترنر شهر قم، از داده‌های

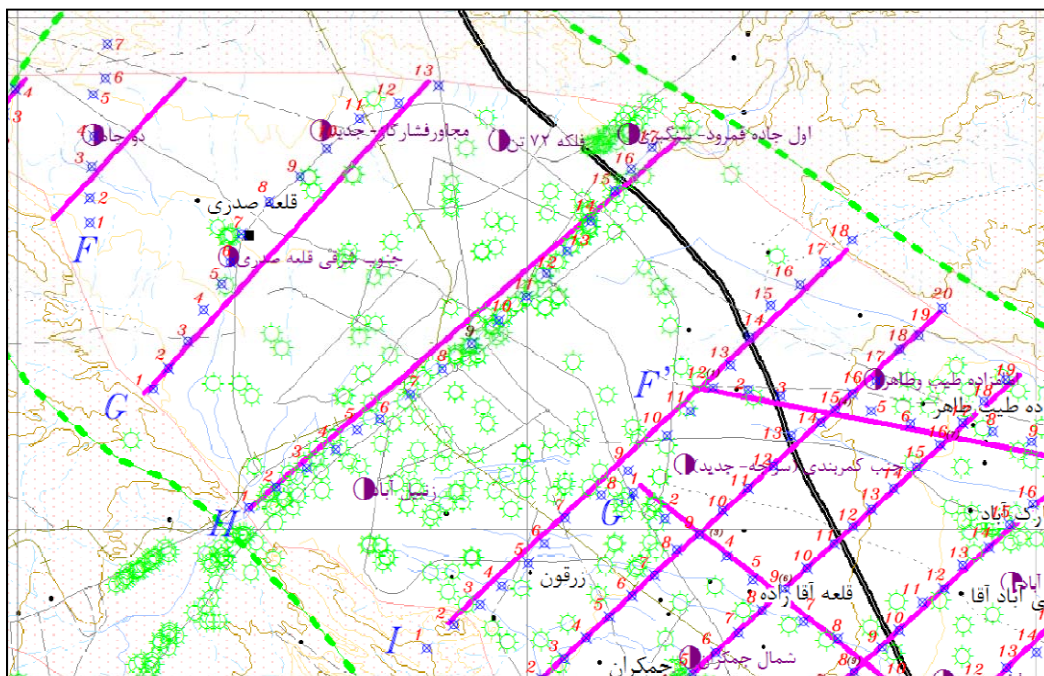


شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر قم (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی قم، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰).

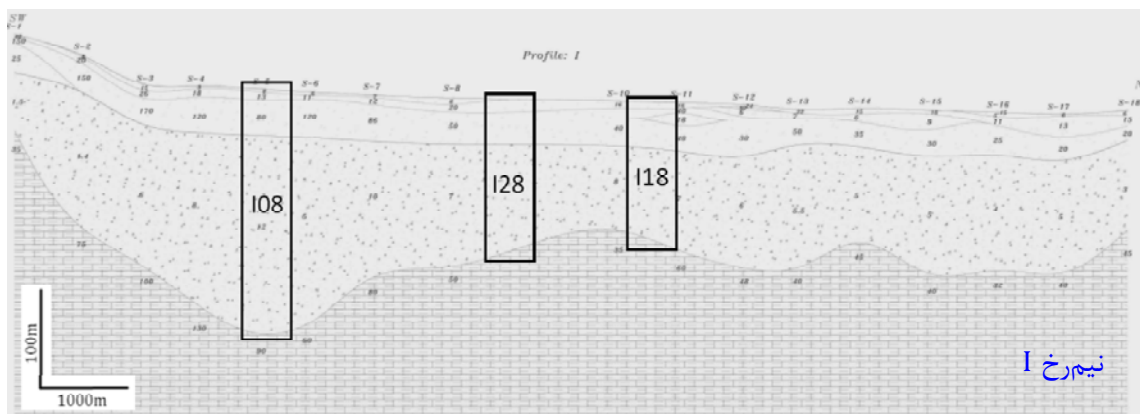
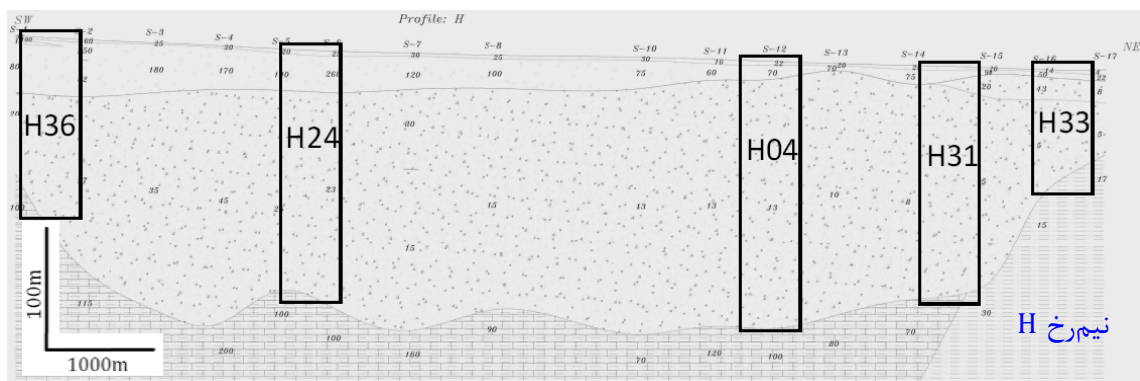
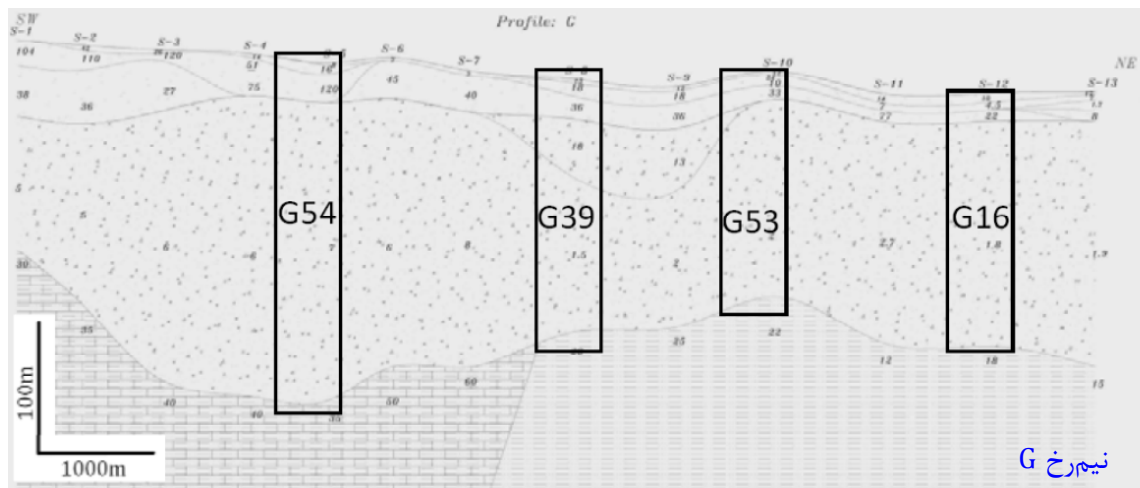
آبرفت‌های سطحی دانه ریز تا دانه متوسط و که عموماً دارای ضخامت محدود کمتر از ۱۵ متر است. لایه دوم شامل آبرفت‌های دانه متوسط تا دانه درشت مرطوب تا خشک است، که دارای ضخامت متغیر از ۵ تا ۵۲ متر در محدوده شهر قم است. لایه سوم شامل یک لایه ضخیم آبرفت است، که از آبرفت‌های دانه ریز تا دانه متوسط تشکیل شده است. بیشترین ضخامت این لایه در امتداد نیم‌رخ H با ضخامت ۲۵۰ متر و کمترین ضخامت این لایه نیز در امتداد نیم‌رخ I با ضخامت ۹۵ متر دیده می‌شود. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی این لایه در نیم‌رخ‌های G و H بیش از مقاومت ویژه الکتریکی آن در نیم‌رخ I است. علت اصلی تغییر مقاومت این لایه، افزایش مصالح ریزدانه رسی آبرفت‌ها از شمال غرب به سمت جنوب شرق دشت قم و همچنین تغییر کیفیت آب زیرزمینی است. آخرین لایه تفکیک شده، سنگ کف را مشخص می‌سازد که از سنگ‌های مارنی و مارن آهکی تشکیل شده است.

در بین نیم‌رخ‌های برداشت شده، سه نیم‌رخ G، H و I در محدوده شهر قم قرار دارند که موقعیت آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. نیم‌رخ G در بخش شمال غربی شهر قم، نیم‌رخ H در محدوده مرکزی شهر و در مسیر رودخانه قم‌رود و نیم‌رخ I نیز در محدوده جنوب شرقی شهر قم قرار دارد. شکل ۳ نیم‌رخ‌های مقاومت الکتریکی ویژه تفسیر شده مقاطع G، H و I را نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود، بخش مرکزی نیم‌رخ‌ها ضخامت آبرفت بیشتری نسبت به بخش‌های ابتدایی و انتهایی دارد که علت آن، فاصله گرفتن از سازندهای سنگی است. کاهش عمق سنگ بستر در محدوده مرکزی نیم‌رخ I به وجود تاقدیس در این منطقه نسبت داده شده است (شرکت زمین کاو گستر، ۱۳۸۷).

از نظر جنس لایه‌های آبرفتی در مقاطع ترسیم شده مقاومت الکتریکی، عموماً ۴ لایه مجزا، قابل تفکیک و تشخیص است. لایه اول شامل خاک‌های دستی و



شکل ۲. موقعیت نیم‌رخ‌های برداشت شده مقاومت‌سنجی در محدوده شهر قم (شرکت زمین کاو گستر، ۱۳۸۷).



شکل ۳. نیمرخ‌های تفسیر شده مقاومت‌سنجی مقاطع G, H, I (شرکت زمین کاو گستر، ۱۳۸۷).

۳ روش بررسی عددی  
 لرزه‌ای قم را به انجام رسانده و شتاب حداکثر افقی زمین را برای پی سنگ، بدون در نظر گرفتن نوع خاک و بر مبنای شرایط تکتونیکی منطقه، محاسبه کرده بود. کمالیان (۱۳۸۶) مطالعات جامعی به منظور ریزپهنه‌بندی شهر قم به

هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی پاسخ لرزه‌ای آبرفت‌های عمیق شهر قم و تابع‌های بزرگ‌نمایی حاصل از آن است. پیش از این رمضی (۱۳۸۱) پهنه‌بندی خطر

گوناگونی از جمله تاریخچه زمانی استرس، استرین و شتاب، طیف دامنه فوری، نسبت طیفی بزرگ‌نمایی دامنه فوری و طیف پاسخ در لایه‌های انتخاب شده، قابل محاسبه و نمایش است.

در روش تحلیل یک‌بُعدی فرض می‌شود که سطح زمین و مرز لایه‌ها افقی است و بزرگ‌نمایی آبرفت، در اثر امواج SH که از بستر سنگی به صورت عمودی منتشر می‌شوند صورت می‌گیرد. در شرایط طبیعی، معمولاً سرعت امواج برشی، از عمق به طرف سطح کاهش می‌یابد. در این حالت امواجی که به صورت مایل از منشأ زلزله به طرف سطح زمین حرکت می‌کنند، با برخورد به مرز لایه‌های با سرعت کمتر، در جهت عمودی تر منتشر می‌شوند. با توجه به این مسئله، فرض انتشار قائم امواج در لایه‌های سطحی زمین، تا حد زیادی به واقعیت نزدیک است. چنان‌که مشخص است، فرضیات تحلیل یک‌بُعدی آبرفت در شرایطی که زمین‌شناسی زیرسطحی ساده باشد، صادق خواهد بود. در مواردی که سنگ بستر دارای توپوگرافی بسیار ناهموار است و یا ساختگاه، در کناره یک حوضه رسوبی قرار دارد، لازم است که از روش‌های دو بُعدی یا سه بُعدی استفاده شود. با توجه به شکل کشیده دره آبرفتی قم و عرض زیاد آن (حدود ۱۰ کیلومتر) در مقایسه با ضخامت رسوبات (حداکثر ۳۰۰ متر)، فرض انتشار یک‌بُعدی و قائم امواج تا حد زیادی قابل قبول است.

#### ۴ محاسبه تابع‌های بزرگ‌نمایی آبرفت‌های عمیق

دو عامل اصلی و مؤثر در پاسخ لرزه‌ای نهشته‌های رسوبی آبرفتی، هندسه لایه‌های رسوبی و مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک است. به منظور مدل‌سازی هندسی لایه‌های آبرفتی کواترنر شهر قم، از مدل استخراج شده براساس بررسی‌های مقاومت‌سنجی دشت قم استفاده شده است. جدول ۱ ضخامت لایه‌های آبرفتی در هریک از نقاط

انجام رسانده‌اند و در این بررسی‌ها از تحلیل‌های عددی یک‌بُعدی پاسخ آبرفت و تحلیل تجربی داده‌های برداشت شده خردلرزه، برای محاسبه تابع‌های بزرگ‌نمایی ساختگاه استفاده کرده‌اند. آنها به منظور شناسایی ویژگی‌های آبرفت‌های شهر قم، بررسی‌های گسترده صحرایی را با اجرای آزمایش‌های لرزه‌نگاری (اندازه‌گیری سرعت سیر امواج در لایه‌های آبرفت) و جمع‌آوری اطلاعات حفاری‌های ژئوتکنیکی عملی ساختند. شکل ۴ موقعیت نقاط داده‌برداری ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی صورت گرفته و همچنین محل نقاط داده‌برداری خردلرزه را نشان می‌دهد. در اغلب نقاط برداشت شده خردلرزه در منطقه مورد بررسی، نسبت‌های طیفی مؤلفه افقی به مؤلفه قائم خردلرزه‌ها (ناکامورا، ۱۹۸۹)، بزرگ‌نمایی واضحی در بسامد ۰/۶ تا ۱/۲ هرتز نشان می‌داد. با این حال نتایج حاصل از تحلیل‌های یک‌بُعدی آبرفت، که با در نظر گرفتن لایه‌های سطحی خاک به انجام رسیده بود، حاکی از بزرگ‌نمایی در محدوده‌های بسامدی بزرگ‌تری بود. در تحقیق حاضر، به منظور ایجاد امکان مقایسه با داده‌های تجربی حاصل از خردلرزه (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۸)، بررسی‌های عددی در سطوح گرنش پایین و با در نظر گرفتن رفتار کشسان صورت گرفته است و نقاط مورد بررسی، در نزدیکی محل اندازه‌گیری خردلرزه انتخاب شده‌اند. در مجموع ۱۲ نقطه مورد بررسی قرار گرفته است که شکل ۴ موقعیت نقاط مورد بررسی در گستره شهر قم را نشان می‌دهد. موقعیت این نقاط روی مقاطع مقاومت‌سنجی شکل ۳ نیز نشان داده شده است.

تحلیل‌های عددی به صورت یک‌بُعدی و با استفاده از نرم‌افزار Deepsoil (هشاش و همکاران، ۲۰۰۹) صورت گرفته است. این نرم‌افزار برنامه تحلیل یک‌بُعدی خطی، خطی معادل و غیرخطی انتشار موج، برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاه است. در این نرم‌افزار، پارامترهای

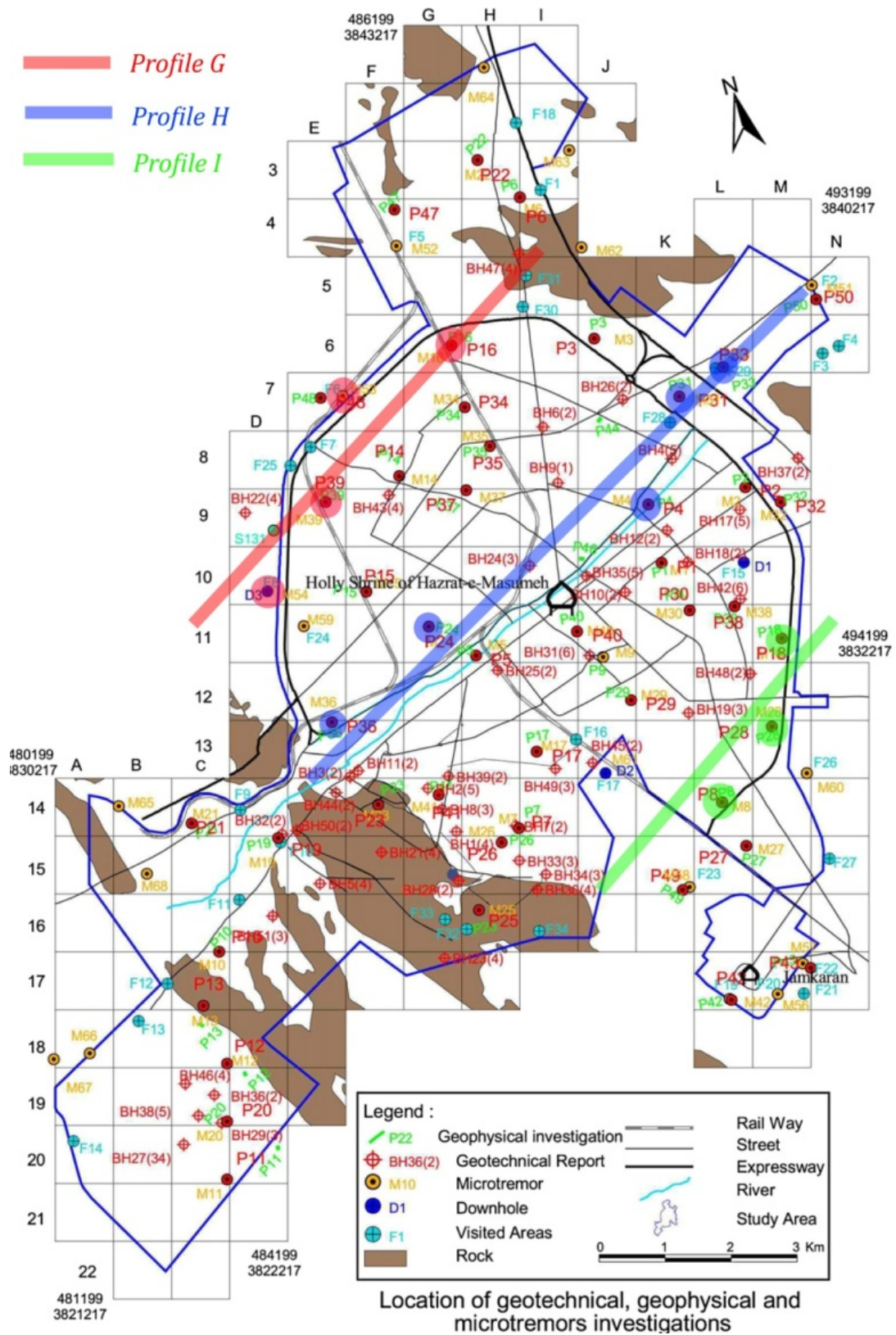
مورد بررسی را براساس نتایج بررسی های مقاومت سنجی دشت قم نشان می دهد. بر این اساس، بیشترین ضخامت لایه های آبرفتی به نقطه G54 با ضخامت حدود ۲۷۵ متر و کمترین ضخامت رسوبات به نقطه I18 با ضخامت ۱۴۵ متر تعلق دارد. با توجه به نبود دسترسی به داده های دقیق مشخصات دینامیکی (سرعت موج برشی) لایه های خاک، از تجربیات حاصل از محیط های زمین شناسی مشابه و خواص توصیفی نهشته های رسوبی استفاده شده است. جدول ها و نمودارهای گوناگونی برای بیان سرعت موج بُرشی لایه های خاک و سنگ براساس ترکیب و جنس آنها در دسترس است (هانست، ۱۹۸۴؛ کاوازانجیان و همکاران ۱۹۹۸). در این پژوهش مقادیر سرعت موج بُرشی لایه های خاک در هر محل، براساس توصیف زمین شناسی نتیجه شده از بررسی های مقاومت سنجی و برخی داده های سرعت موج بُرشی اندازه گیری شده در لایه های نزدیک به سطح زمین (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۸) تعیین شده است. عدم قطعیت موجود در تعیین سرعت موج بُرشی به روش ذکر شده، منجر به تعریف سه سناریو متفاوت براساس توصیف زمین شناسی شده است. برای سنگ بستر زمین شناسی نیز به همین ترتیب عمل شده است. در نهایت سرعت های موج بُرشی در هر یک از

لایه های آبرفت و سنگ بستر براساس سه سناریو اشاره شده و نیز توصیف زمین شناسی آن، متغیر در نظر گرفته شده است. در هر سناریو، تفاوت سرعت موج بُرشی در نقاط گوناگون مورد بررسی، به توصیف زمین شناسی و ترکیب بافتی آن ارتباط می یابد که براساس بررسی های مقاومت سنجی به دست آمده است. برای مثال براساس بستر ماری سرعت موج بُرشی از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بر ثانیه و برای آهک ماری سرعت موج بُرشی از ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. جدول ۲ تا ۴ سرعت موج بُرشی لایه های آبرفتی و سنگ بستر را در سه سناریو متفاوت برای نقاط مورد بررسی نشان می دهد. نسبت میرایی نیز برای همه لایه های آبرفتی، ۳ درصد و برای لایه سنگ بستر، ۱ درصد در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن سه سرعت متفاوت P1 (سرعت موج بُرشی کم)، P2 (سرعت موج بُرشی متوسط) و P3 (سرعت موج بُرشی زیاد) برای لایه های آبرفتی و سه سرعت متفاوت B1 (سرعت موج بُرشی کم)، B2 (سرعت موج بُرشی متوسط) و B3 (سرعت موج بُرشی زیاد) برای لایه سنگ بستر، در مجموع ۹ نیم رخ نماینده در هر نقطه به دست آمده است.

جدول ۱. ضخامت لایه های آبرفتی در نقاط مورد بررسی.

Point	Thickness (m)		
	Layer 1	Layer 2	Layer 3
G-54	5	35	235
G-39	10	25	190
G-53	10	20	155
G-16	15	10	180
H-36	5	50	130
H-24	5	35	200
H-04	5	15	240
H-31	10	15	205
H-33	5	5	145
I-08	10	35	210
I-28	15	35	105
I-18	10	40	95





شکل ۴. موقعیت نقاط داده‌برداری خردلرزه مورد استفاده در تحقیق حاضر (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۸ با اصلاح).

جدول ۲. سرعت موج بُرشی کمینه در لایه‌های آبرفتی.

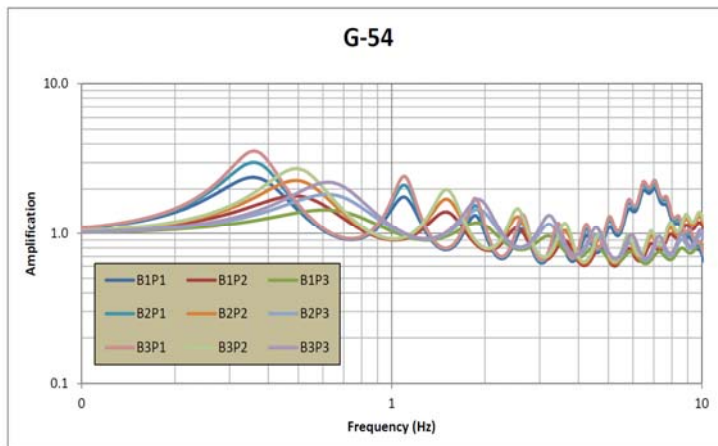
Point	Min. Shear Wave Velocity (m/s)			
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Bedrock
G-54	150	650	400	1000
G-39	150	550	350	1000
G-53	150	450	300	800
G-16	150	400	250	800
H-36	150	650	400	1000
H-24	170	600	400	1000
H-04	140	500	250	1000
H-31	100	450	250	1000
H-33	100	400	200	800
I-08	150	650	450	1000
I-28	100	500	350	1000
I-18	100	450	200	1000

جدول ۳. سرعت موج بُرشی میانگین در لایه‌های آبرفتی.

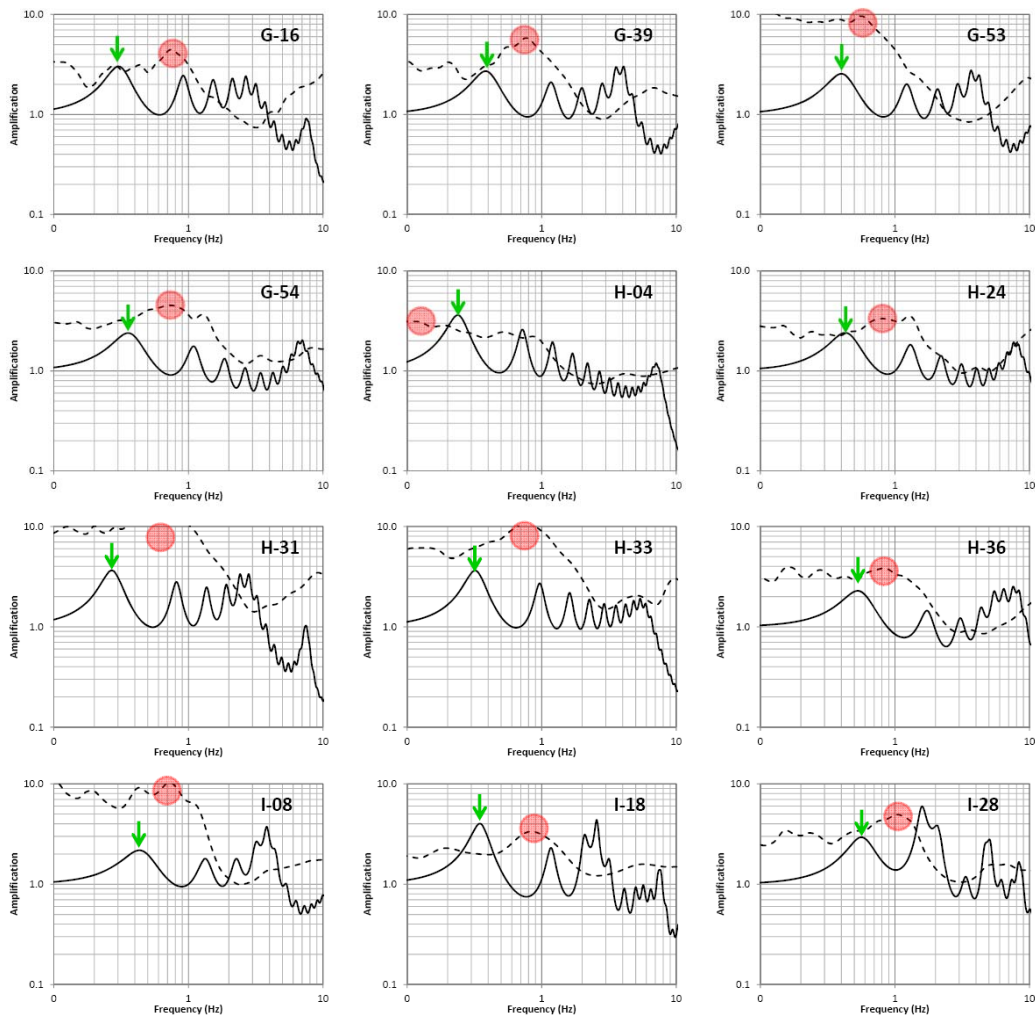
Point	Mean Shear Wave Velocity (m/s)			
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Bedrock
G-54	250	800	550	1300
G-39	220	700	500	1200
G-53	210	600	450	1000
G-16	210	550	400	1000
H-36	300	800	550	1300
H-24	270	750	520	1300
H-04	240	650	400	1300
H-31	210	600	350	1200
H-33	200	550	350	1000
I-08	250	800	600	1300
I-28	200	650	500	1300
I-18	150	600	400	1300

جدول ۴. سرعت موج بُرشی بیشینه در لایه‌های آبرفتی.

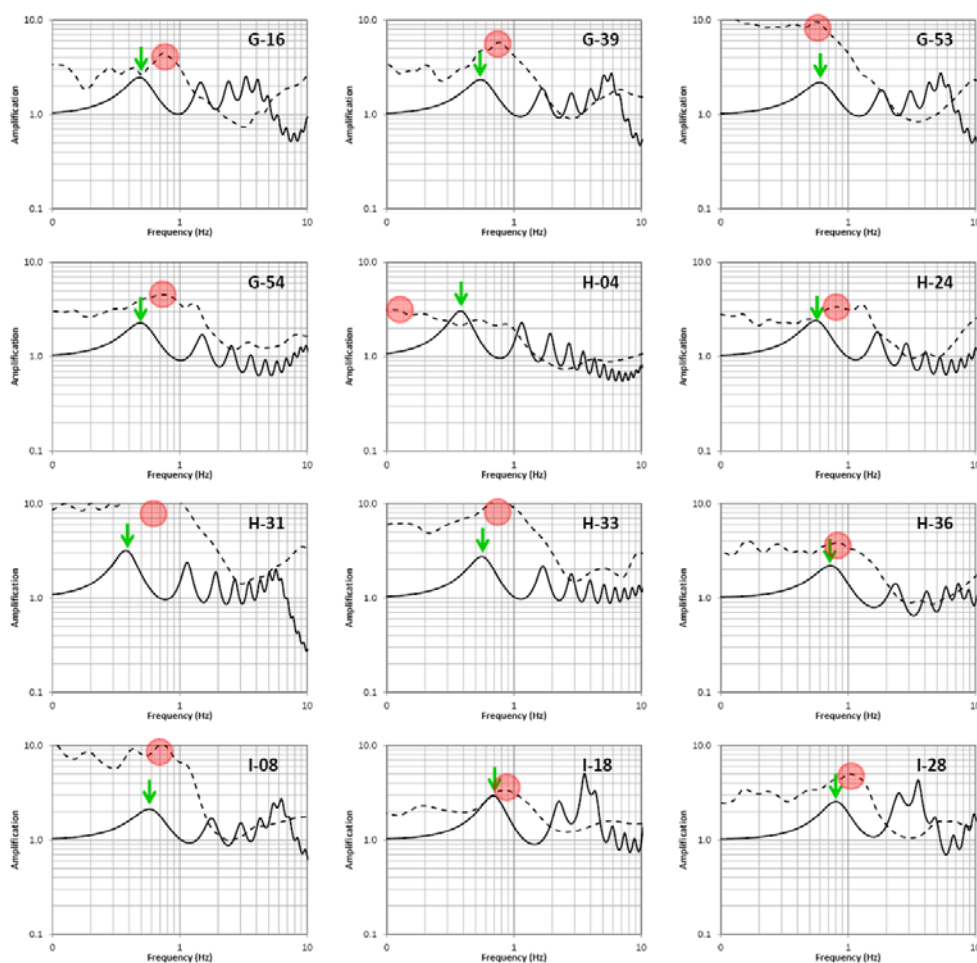
Point	Max. Shear Wave Velocity (m/s)			
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Bedrock
G-54	350	950	700	1600
G-39	350	850	650	1500
G-53	250	700	550	1200
G-16	250	700	550	1200
H-36	450	950	700	1600
H-24	400	900	680	1600
H-04	340	800	550	1600
H-31	350	800	450	1500
H-33	300	700	500	1200
I-08	350	900	750	1600
I-28	300	800	650	1600
I-18	200	750	600	1600



شکل ۵. منحنی‌های بزرگ‌نمایی طیفی نقطه G54.



شکل ۶. بزرگ‌نمایی طیفی به‌ازای مدل سرعت موج پُرش‌ی کمینه، منحنی خط‌چین تابع بزرگ‌نمایی روش تجربی (تحقیقات خردلرزه) و منحنی پیوسته تابع بزرگ‌نمایی روش عددی را نشان می‌دهد. محدوده‌های بزرگ‌نمایی روش تجربی و عددی به‌ترتیب با دایره و پیکان نشان داده شده است.



شکل ۷. بزرگ‌نمایی طیفی به‌ازای مدل سرعت موج بُرشی میانگین، منحنی خط‌چین تابع بزرگ‌نمایی روش تجربی (تحقیقات خردلرزه) و منحنی پیوسته تابع بزرگ‌نمایی روش عددی را نشان می‌دهد. محدوده‌های بزرگ‌نمایی روش تجربی و عددی به‌ترتیب با دایره و پیکان نشان داده شده است.

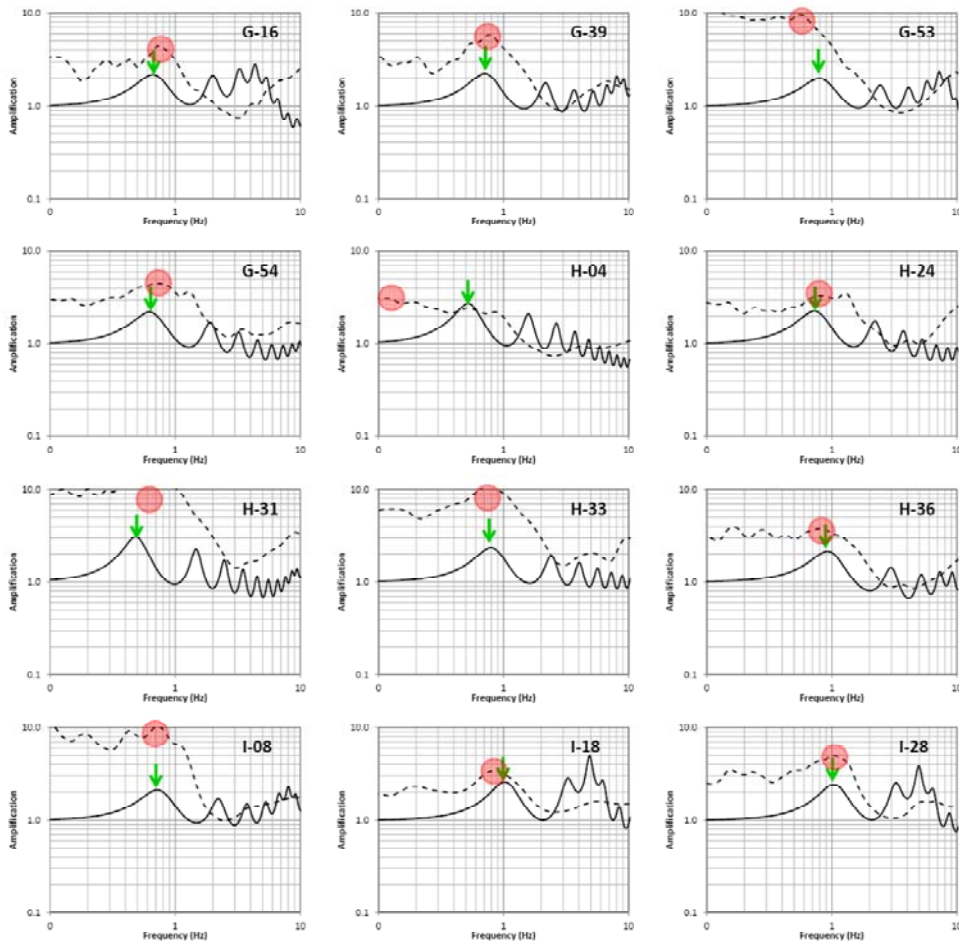
محدوده بسامدی بزرگ‌نمایی تغییر نمی‌کند. همچنین با افزایش سرعت موج بُرشی آبرفت، علاوه بر تغییر دامنه بزرگ‌نمایی، محتوای بسامدی نیز تغییر می‌یابد. با افزایش سرعت موج بُرشی آبرفت، دامنه بزرگ‌نمایی کاهش، و بسامد بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد. مطابق انتظار، چنین الگویی از بزرگ‌نمایی در سایر نقاط نیز مشاهده شده است.

شکل‌های ۶ تا ۸ تابع بزرگ‌نمایی سطح زمین نسبت به سنگ بستر را نشان می‌دهند. شکل ۶ تابع بزرگ‌نمایی در مدل سرعت موج بُرشی کم (B1P1)، شکل ۷ تابع بزرگ‌نمایی در مدل سرعت موج بُرشی میانگین (B2P2)

تحلیل پاسخ لرزه‌ای آبرفت، برای هریک از نیم‌رخ‌های نماینده به انجام رسید و در هر مورد نسبت طیف دامنه فوریه شتاب‌نگاشت در سطح زمین، به طیف دامنه فوریه حرکت سنگ کف، درحکم تابع بزرگ‌نمایی، مورد بررسی قرار گرفت. مجموع کل نیم‌رخ‌های تحلیل شده با در نظر گرفتن ۹ نیم‌رخ نماینده برای هر نقطه، ۱۰۸ نیم‌رخ بوده است. شکل ۵ نمونه‌ای از منحنی‌های بزرگ‌نمایی طیفی در یکی از نقاط مورد بررسی را نشان می‌دهد. آن‌چنان که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت موج بُرشی سنگ بستر، فقط دامنه بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد، لیکن محتوای بسامدی و

محدوده بسامدهای کمتر از ۱ هرتز هستند. از نظر دامنه بزرگ‌نمایی در اغلب نقاط مورد بررسی، دامنه بزرگ‌نمایی حاصل از خردلرزه‌ها بیش از دامنه بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی عددی بوده است. بررسی‌های اخیر صورت گرفته روی ماهیت خردلرزه‌ها و نحوه استفاده از آنها در اثرات ساختگاهی، اعتبار روش H/V را به بسامد قله اصلی بزرگ‌نمایی مشاهده شده تحت شرایط معینی محدود کرده است (بارد، ۲۰۰۵). با توجه به این مسئله، بسامدهای بزرگ‌نمایی حاصل از تحقیق حاضر، با نتایج حاصل از خردلرزه‌ها مورد مقایسه کمی قرار گرفته است.

و شکل ۸ تابع بزرگ‌نمایی در مدل سرعت موج بُرشی زیاد (P3B3) را نشان داده است. در این شکل‌ها همچنین منحنی‌های بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های تجربی پیشین مبتنی بر خردلرزه به منظور مقایسه آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، تابع‌های بزرگ‌نمایی خردلرزه، اغلب دارای قله واضحی در بسامدهای کمتر از ۱ هرتز هستند. برخی از نقاط نظیر G-53 و H-04 اگرچه دارای قله واضحی در این محدوده بسامدی نیستند، اما مقادیر بزرگ‌نمایی زیادی در این محدوده دارند. در کنار این نتایج، تابع‌های بزرگ‌نمایی عددی حاصل از در نظر گرفتن آبرفت‌های عمیق نیز همگی دارای قله مشخصی در



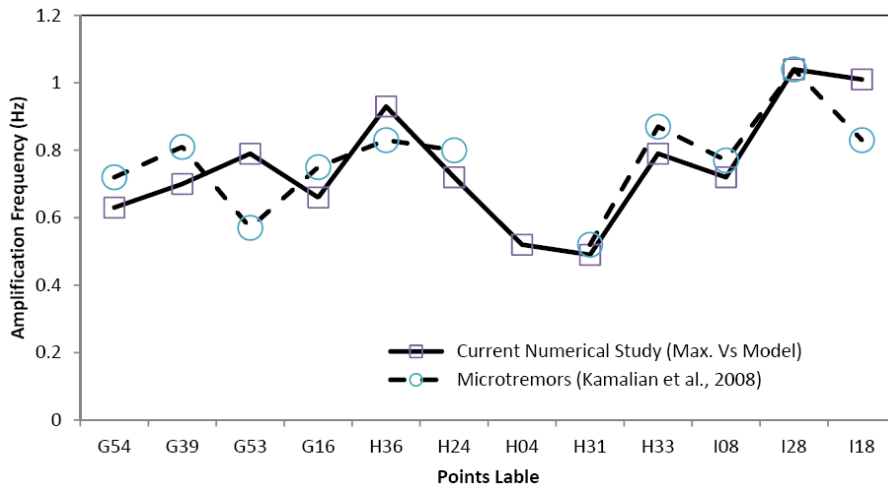
شکل ۸ بزرگ‌نمایی طیفی به‌ازای مدل سرعت موج بُرشی بیشینه، منحنی خط‌چین تابع بزرگ‌نمایی روش تجربی (تحقیقات خردلرزه) و منحنی پیوسته تابع بزرگ‌نمایی روش عددی را نشان می‌دهد. محدوده‌های بزرگ‌نمایی روش تجربی و عددی به ترتیب با دایره و پیکان نشان داده شده است.

جدول ۵. ضخامت لایه‌های آبرفتی و محدوده بسامدی بزرگ‌نمایی نقاط بررسی شده.

Point	Thickness (m)	Amplification Frequency (Hz)			
		Shear Wave Velocity Model			Microtremors
		Min.	Mean	Max.	
G54	275	0.35	0.49	0.63	0.72
G39	225	0.38	0.55	0.70	0.81
G53	185	0.40	0.60	0.79	0.57
G16	205	0.31	0.49	0.66	0.75
H36	185	0.52	0.72	0.93	0.83
H24	240	0.43	0.55	0.72	0.80
H04	260	0.23	0.38	0.52	?
H31	230	0.27	0.38	0.49	0.52
H33	155	0.32	0.56	0.79	0.87
I08	255	0.43	0.57	0.72	0.77
I28	155	0.56	0.79	1.04	1.04
I18	145	0.34	0.68	1.01	0.83

منظور نشده است. به‌جز نقطه G-53 سازگار نسبی بسیار مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر و بررسی‌های خردلرزه‌سنجی دیده می‌شود. با وجود این و مهم‌تر از هم‌خوانی جواب‌های به‌دست آمده، مسئله وجود بزرگ‌نمایی شاخص در محدوده بسامدهای کمتر از یک هرتز مهم و قابل توجه است. این تحقیق نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثرات آبرفت‌های عمیق کواترن و سنگ بستر زمین‌شناسی به‌جای سنگ بستر لرزه‌ای مرسوم، بزرگ‌نمایی لایه‌های آبرفتی در محدوده بسامدهای کمتر از یک هرتز، که در تحلیل‌های عددی مبتنی بر سنگ بستر لرزه‌ای مرسوم (سرعت موج بُرشی حدود ۶۰۰-۸۰۰ متر بر ثانیه) مشاهده نشده بود، قابل شناسایی است. این مسئله ضرورت توجه به آبرفت‌های عمیق در بررسی‌های عددی اثرات ساختگاهی و یا استفاده هم‌زمان و تفسیر دقیق داده‌های خردلرزه و اثرات آبرفت‌های سطحی را نشان می‌دهد.

جدول ۵ ضخامت لایه‌های آبرفتی و محدوده بسامدی بزرگ‌نمایی نقاط مورد بررسی را در تحقیق حاضر و بررسی تجربی پیشین نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، در اکثر نقاط مورد بررسی و در مدل‌های سرعت کم و میانگین، بسامد بزرگ‌نمایی نتایج حاصل از خردلرزه‌ها بیش از بسامد بزرگ‌نمایی تحلیل‌های عددی است، اما در مدل سرعت زیاد، هم‌خوانی مناسبی بین جواب‌های حاصل از بررسی‌های تجربی و عددی مشاهده می‌شود. علاوه بر این در مدل سرعت زیاد، فارغ از مقادیر دامنه بزرگ‌نمایی، روند کلی تابع‌های بزرگ‌نمایی نیز سازگاری مناسبی با منحنی‌های بزرگ‌نمایی حاصل از تحقیقات خردلرزه آشکار می‌سازد. شکل ۹ مقادیر بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از بررسی‌های عددی حاضر با در نظر گرفتن مدل سرعت زیاد را با بسامد بزرگ‌نمایی حاصل از تحقیقات خردلرزه در ۱۲ نقطه بررسی شده را مورد مقایسه قرار داده است. تحقیقات خردلرزه در نقطه H-04 فاقد قله مشخصی است و بسامد بزرگ‌نمایی برای آن



شکل ۹. مقایسه بسامد اصلی بزرگ‌نمایی بررسی‌های عددی با مدل سرعت موج بُرشی بیشینه و بسامد بزرگ‌نمایی بررسی‌های تجربی.

## ۵ نتیجه‌گیری

در حال حاضر بسیاری از تحلیل‌های عددی اثرات ساختگاهی لایه‌های آبرفتی، بدون توجه به ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی عمیق صورت می‌گیرد. این در حالی است که تباین قوی موجود بین سنگ بستر زمین‌شناسی و لایه‌های آبرفتی عمیق می‌تواند سبب ایجاد الگوی بزرگ‌نمایی شاخصی در بسامدهای کم شود. موارد متعددی از ناسازگاری بین نتایج تحلیل‌های حاصل از نگاشت‌های لرزه‌ای و بررسی‌های عددی مبتنی بر سنگ بستر لرزه‌ای مرسوم تعریف شده براساس سرعت موج برشی، در نوشتارهای فنی گزارش شده است. نتایج حاصل از بررسی اثرات ساختگاهی با در نظر گرفتن آبرفت‌های عمیق شهر قم، منجر به شناسایی بزرگ‌نمایی مشخصی در محدوده بسامدهای کمتر از ۱ هرتز شده است که موضوع نبود سازگاری بین نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی در پژوهش‌های پیشین را مرتفع خواهد کرد. اگرچه در تحقیق حاضر به علت نبود دسترسی به مشخصات دینامیکی لایه‌های آبرفت، امکان مقایسه دقیق وجود نداشته است، اما موضوع وجود بزرگ‌نمایی در این محدوده بسامدی و سازگاری

نسبی آن با نتایج بررسی‌های خردلرزه، حاکی از اثرگذاری آبرفت‌های عمیق در تابع‌های بزرگ‌نمایی ساختگاه است. با توجه به این مسئله، توجه به وضعیت شکل حوضه رسوبی و در نظر گرفتن اثرات آبرفت‌های عمیق در بررسی اثرات ساختگاهی به روش عددی، مورد تاکید است. در صورتی که شناخت کاملی از وضعیت آبرفت‌های عمیق در دسترس نباشد، استفاده هم‌زمان از روش‌های تجربی مبتنی بر نگاشت‌های خردلرزه یا جنبش ضعیف ضرورت خواهد داشت. اکثر آیین‌نامه‌های ساختمانی طراحی مقاوم در برابر زمین‌لرزه نیز صرفاً به اثرات آبرفت‌های سطحی بسنده کرده‌اند، و این در حالی است که آبرفت‌های عمیق در بزرگ‌نمایی ساختگاه، به‌خصوص در بسامدهای کم موثر است و در نظر گرفتن آن به‌ویژه در طراحی سازه‌های بلندمرتبه مورد نیاز است. در این تحقیق سرعت موج بُرشی لایه‌های آبرفت و سنگ بستر زمین‌شناسی براساس داده‌های موجود و توصیف زمین‌شناسی تعیین شده است؛ تهیه نیم‌رخ‌های سرعت موج بُرشی لایه‌های خاک و سنگ بستر زمین‌شناسی می‌تواند به تدقیق نتایج تحقیق حاضر کمک کند.

- EERA: A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California, Berkeley.
- Borcherdt, R. D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (Methodology and Justification), *Earthquake Spectra* **10**, 617-653.
- BSSC, 2003, The NEHRP (National earthquake hazards reduction program) recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, part 1: provisions, Building Seismic Safety Council, FEMA 368.
- Dobry, R., Borcherdt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E. and Seed, R. B., 2000, New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions, *Earthquake Spectra*, **16**, 41-67.
- EduPro Civil Systems, 2000, ProShake: ground response analysis program, user's manual, version 1.1, EduPro Civil Systems, Inc. Redmond, Washington.
- Hunt, R. E., 1984, *Geotechnical engineering investigation handbook*, Taylor and Francis, Boca Raton, Florida.
- Hashash, Y. M. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., Park, D., 2009, *Deepsoil V5.0*, user manual and tutorial, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- ICBO, 1997, *Uniform building code*, International Council of Building Officials.
- ICC, 2000, *International building code*, International Code Council.
- Idriss, I. M. and Sun, J. I., 1992, SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, user's guide, University of California, Davis, California, 13 pp.
- Ishihara, k., Ansal, A. M., 1982, Dynamic behavior of soil, soil amplification and soil structure interaction, Final Report for Working Group D, UNDP/UNESCO Project on Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region.
- ISSMGE, 1999, Manual for zonation on seismic geotechnical hazards (Revised Version), The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4) of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Published by The Japanese Geotechnical Society.
- مراجع  
آقائباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- جعفری، م. ک.، ۱۳۸۱، گزارش نهایی مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای جنوب تهران، برنامه ملی تحقیقات شورای پژوهش‌های علمی کشور، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- حافظی مقدس، ن.، ۱۳۸۶، مجموعه گزارش‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد، سازمان مسکن و شهرسازی خراسان رضوی.
- رمضی، ح. ر.، ۱۳۸۱، لرزه‌زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی و برآورد خطر نسبی زمین‌لرزه استان قم، سازمان مسکن و شهرسازی استان قم.
- شرکت زمین کاو گستر، ۱۳۸۷، گزارش ژئوالکتریک دشت قم، شرکت آب منطقه‌ای قم، وزارت نیرو.
- کمالیان، م.، ۱۳۸۶، مطالعات لرزه‌خیزی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای قم، شهرداری قم، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، ویرایش سوم، وزارت مسکن و شهرسازی.
- نقشه زمین‌شناسی قم، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، وزارت معادن و فلزات.
- Bard, P. Y., 2005, SESAME project, Site effects assessment using Ambient excitations, European Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, Final Report.
- Bard, P. Y., 1997, Local effects on strong ground motion: Basic physical phenomena and estimation methods for microzoning studies, Advanced study course on seismic risk (SERINA), Thessaloniki, Greece, 229-299.
- Bardet, J. P. and Tobita, T., 2001, NERA: A computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits Department of Civil Engineering, University of Southern California, Berkeley.
- Bardet, J. P., Ichii, K. and Lin, C. H., 2000,



- microtremor on the ground surface, Quarterly Report of RTRI, **30**(1), 25-33.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B., 1972, SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12 Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., 2001, Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation, Proceedings of Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn, San Diego, California, Paper No. SPL-2.
- Jafari, M. K., Ghayamghamian, M. R., Davoodi, M., Kamalian, M., Sohrabi-Bidar, A., 2005, Site effects of the 2003 Bam, Iran Earthquake, Earthquake Spectra, **21**(S1), S125-S136.
- Kamalian, M., Jafari, M. K., Ghayamghamian, M. R., Shafiee, A., Hamzehloo, H., Haghshenas, E., Sohrabi-bidar, A., 2008, Site effect microzonation of Qom, Iran, Engineering Geology, **97**, 63-79.
- Kavazanjian, E., Matasovic, N., Hadj-Hamou, T., and Wang, J., 1998, Geotechnical earthquake engineering, reference manual, NHI Course No. 13239, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, Arlington, Virginia.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using