رویکرد روش‌های مختلف مطالعاتی برای ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم

سعید هاشمی‌طباطبایی[1]*، اشکان محمدی [1] و امیرسعید سلامت[1]

[1] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۵/۰۹

چکیده

زمین‌لرزه ویرانگر شهر بم در ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲ به وقوع پیوست. بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم با هدف برآورد ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک لرزه‌ای به منظور کاهش خطرات ناشی از زلزله پس از این رخداد، آغاز شد. ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم در قالب بررسی‌های ژئوالکتریک، ژئوسیسمیک، ژئوتکنیک، مطالعات لرزه زمین‌ساخت، تحلیل خطر و ژئوتکنیک لرزه‌ای در شهر انجام گرفت. بر اساس بررسی‌های ژئوسیسمیک و استاندارد ۲۸۰۰ آبرفت شهر بم از نوع I و II بوده و در بیشتر مناطق ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای کمتر از ۳۰ متر است. وجود ۱۰ نوع خاک و نحوه گسترش سطحی و ژرفایی آنها بر مبنای کاوش‌های ژئوتکنیکی و حفاری ماشینی به صورت خشک و مغزه‌گیری پیوسته، مشخص شد. نقشه‌های پربندی شتاب بیشینه افقی و قائم و ارائه طیف‌های خطر یکنواخت در سطوح مختلف لرزه‌ای در سنگ بستر، تهیه شد. با تحلیل پاسخ ساختگاه، متغیرهای مختلف حرکت در سطح زمین شامل بیشینه شتاب، دوره تناوب متناظر با بیشترین تشدید، ضریب بزرگنمایی و ...منطقه مورد مطالعه برای دوره بازگشت‌های مختلف پهنه‌بندی شد. بر اساس نتایج، محدوده شهر بم به چهار ناحیه کلی افراز و برای هر کدام از آنها به صورت جداگانه طیف‌های طراحی پیشنهاد شد. برخی از طیف‌های حاصل با طیف‌های طراحی آیین‌نامه اروپا و استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شد.

کلیدواژه‌ها: ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، زمین‌لرزه بم، نوع زمین، متغیرهای حرکت، طیف طراحی

***نویسنده مسئول:** سعید هاشمی‌طباطبایی

E- mail: htabatabaei@bhrc.ac.ir

۱–مقدمه

با توجه به شرایط زمین‌ساختی ایران و وجود گسل‌های متعدد در سطح کشور، بسیاری از شهرها در جوار این گسل‌ها ساخته شده‌اند و همواره در معرض خطر رخداد زلزله‌های نزدیک گسل با شدت بالا قرار دارند. زمین‌لرزه، ایمنی تأسیسات حیاتی مانند بیمارستان‌ها، مراکز آتش‌نشانی، مراکز امداد رسانی مانند هلال احمر، مدارس، مراکز نظامی- انتظامی و ادارات دولتی و... را به مخاطره می‌اندازد و قطع آب و برق شهر، بریدگی لوله‌های گاز و ایجاد آتش‌سوزی، صدمات به خطوط مخابراتی، مسدود شدن راه‌ها و خیابان‌ها و مواردی مانند آن در یک زمین‌لرزه ویرانگر دور از انتظار نیست. پهنه لرزه‌خیز ایران زلزله‌های مهیب زیادی را تجربه کرده است و این موضوع حساسیت مدیران، مهندسان و حتی افراد عادی را نسبت به خطر زلزله تشدید کرده است. با توجه به این واقعیت که مقاوم‌سازی و طراحی سازه‌ای مقاوم، تا زمانی که در تعامل و مرتبط با شرایط و ویژگی‌های رفتاری ساختگاه نباشد، نمی‌تواند به تنهایی ایمنی کامل و همه جانبه‌ای را تضمین کند. خرابی‌ها و صدمات وارده به ساختمان‌ها و تأسیسات شهری در زمین‌لرزه‌های مخرب به طور عمده پیرو شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بستر آبرفتی شهر است و ساختار پیچیده زمین موجب بروز رفتارهای متفاوتی در هنگام رخداد زمین‌لرزه می‌شود. به منظور شناخت این پیچیدگی‌ها و اثرات آنها لزوم انجام برخی بررسی‌ها و پژوهش‌ها احساس می‌شود. بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای امروزه به عنوان برنامه‌ریزی بنیادی پژوهش در بلایای طبیعی گفته می‌شود که یکی از عمده‌ترین فعالیت‌ها در راستای کاهش خطرات ناشی از زلزله و افزایش ایمنی عمومی در مناطق شهری است. ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، برآورد پارامترهای حرکتی زمین در طی زلزله‌های احتمالی در نقاط مختلف شهر بر اساس شرایط زمین‌شناسی محلی و وضعیت زمین‌ساختی- لرزه‌ای موجود در منطقه است. ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در تعیین راهبرد کاربری‌های شهری، جایابی سازه‌های مهم و تأسیسات و شریان‌های حیاتی، طراحی و اجرای سازه‌ها، مدیریت بحران در هنگام رخداد زمین‌لرزه و مانند آن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

زمین‌لرزه ۵ دی‌ماه ۱۳۸۲ بم یکی از ویرانگرترین زمین‌لرزه‌های تاریخ کشورمان است. زمین‌لرزه بم با بزرگای گشتاوری ۶/۶ در مقیاس ریشتر همراه با گسلش و شکاف‌هایی در سطح زمین رخ داد. تجربه تلخ این زلزله مهیب، هشداری برای جدی گرفتن شناسایی اثرات زلزله بود. در این راستا، بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم انجام گرفت (هاشمی‌طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۵). هدف از این بررسی‌ها برآورد ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی به منظور کاهش خطرات ناشی از زلزله با توجه به شرایط ساختگاهی در قالب بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی، تحلیل خطر، بررسی‌های ژئوالکتریک، زمین‌لرزه‌ای، ژئوتکنیک، و ژئوتکنیک لرزه‌ای در شهر بم است.

۲– روش بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم

مراحل مختلف بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، به دقت عمل بستگی دارد. اثرات ساختگاه با توجه به اهداف مورد نظر در سه سطح کم، متوسط و زیاد مورد بررسی قرار می‌گیرد (TC4, 1999). در شهر بم، مطالعات بر اساس دقت متوسط تا زیاد صورت گرفته است. هدف از اجرای ریزپهنه‌بندی با دقت متوسط تا زیاد، ارزیابی و شناخت پدیده‌های مختلف مرتبط با زمین‌لرزه در شهرها است. خروجی مطالعات ریزپهنه‌بندی نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای حرکتی زمین مانند شتاب افقی و قائم و شتاب طیفی و همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی دوره تناوب چیره خاک است تا بتوان با استفاده از نتایج ساخت و ساز ایمن‌تر در زمان رویداد زلزله داشت. در راستای هدف یاد شده مراحل مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بم عبارتند از:

- بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی: تعیین نوع نهشته‌های سطحی، ژرفای سنگ بستر و ویژگی‌های دینامیکی نهشته‌ها در پهنه شهر با استفاده از شناسایی‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی
- بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت و تحلیل خطر زلزله: تعیین احتمالاتی و قطعی متغیرهای حرکتی زلزله محتمل در نقاط مختلف شهر
- تعیین ویژگی‌های حرکتی و تحلیل پاسخ زمین

۳– مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

انجام یک طراحی مهندسی موفق، مستلزم کسب اطلاعات کافی از محیط زمین‌شناسی

یعنی محل تماس مستقیم سازه با محیط اطراف است. این سازه‌ها صرف‌نظر از این که در سطح یا درون زمین احداث شوند به طور دایم از زمین و محیط اطراف آن که محیط زمین‌شناسی نام دارد تأثیر می‌پذیرند. میزان این تأثیرپذیری در دقت پهنه‌بندی از اهمیت خاص برخوردار خواهد بود. به طوری که تعیین شرایط موضعی زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه و اثرات آن بر ویژگی‌های لرزه‌ای زمین به هنگام زمین‌لرزه از جمله فعالیت‌هایی است که باید صورت پذیرد.

بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی با انجام مطالعات سطحی آغاز می‌شود. نتیجه این بررسی‌ها تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی است(هاشمی‌طباطبایی و همکاران، ۱۳۸۸). در ادامه، تلفیق هر چه بهتر اطلاعات در بررسی‌های زیرسطحی با هدف کسب اطلاعات کمی از محل و استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی و مغزه‌گیری پیوسته و در نهایت تطابق لایه‌ها و مقاطع با استفاده از نرم‌افزارهای مرتبط، انجام می‌شود. با توجه به اهداف پهنه‌بندی لرزه‌ای، بررسی‌های ژئوفیزیکی در قالب روش لرزه‌ای انکساری کم ژرفا می‌تواند ساختارهای زیر سطحی را در راستای نیمرخ مختلف به تصویر کشد. در ادامه، به منظور تهیه تصویر دقیق از گسترش لایه‌های زیرسطحی، عملیات حفاری به صورت خشک مغزه‌گیری پیوسته در نقاط مختلف به همراه انجام آزمون‌های برجا و تهیه نمونه‌های دست نخورده و نگاشت(لوگ) گمانه‌ها صورت گرفت.

۳-۱.بررسی‌های ژئوفیزیک

تعیین نوع نهشته‌های سطحی به تنهایی انجام یک پهنه‌بندی کاربردی برای یک شهر به شمار می‌رود. برای این منظور اطلاعات مربوط به گمانه‌های موجود پیشین، اطلاعات چاه‌های ژرف، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای افزایش دقت تعیین نوع نهشته‌ها و ویژگی‌های دینامیکی آنها از روش‌های ژئوفیزیکی می‌توان استفاده کرد و نوع نهشته‌ها را بر اساس سرعت انتشار موج برشی در لایه‌های سطحی طبقه‌بندی کرد. در بررسی‌های ژئوفیزیک، روش انکساری (Hawkins, 1961) و لرزه‌ای درون چاهی به منظور بررسی سرعت امواج تراکمی و برشی، تعیین ضریب پواسون و ضرایب دینامیکی برای لایه‌های تشکیل‌دهنده سطحی و کم ژرفای زمین استفاده می‌شود (Hardage, 2000). در گستره شهر بم، نحوه پراکندگی نیمرخ‌های لرزه‌ای، بر اساس پوشش کامل و امکان تطابق فراگیر قابل اطمینان از دیدگاه بررسی‌های مهندسی ژئوفیزیک طراحی شد (Japan Road Association, 2002). بنابراین با در نظر گرفتن میزان و گستره تخریب بر اثر زلزله، پراکندگی نیمرخ‌های لرزه‌ای و اندازه‌گیری درون چاهی مشخص شده و امواج تراکمی و برشی به روش انکساری در مجموع ۱۶۰ نیمرخ (۸۰ نیمرخ مربوط به امواج طولی و ۸۰ نیمرخ دیگر برای امواج برشی) و درون چاهی در ۱۵ گمانه اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

بر اساس نتایج حاصل، مقادیر پارامترهای سرعت، ستبرا و ضرایب دینامیکی لایه‌ها تعیین شدند. نتایج نشان می‌دهند مقایسه پراکندگی مقادیر به دست آمده برای امواج برشی و امواج تراکمی برای لایه‌های شناسایی شده تطابق خوبی را نشان می‌دهند. در ساختگاه مورد مطالعه بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده به‌طور عمده ۳ لایه لرزه‌ای تا ژرفای ۳۰ متری تشخیص داده شد. اما در شمال و شمال‌خاور شهر، تنها دو لایه لرزه‌ای در نظر گرفته شد. در این محدوده یک لایه کم سرعت بر روی یک لایه پرسرعت قرار گرفته است لایه دوم در نظر گرفته نشده است (شکل ۲).

طبقه‌بندی زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴)، بر اساس جدول ۱ صورت می‌گیرد. براساس این جدول می‌توان با استفاده از میانگین سرعت موج برشی و ژرفای سنگ بستر که از مطالعات زمین‌لرزه‌ای حاصل می‌شود، زمین ساختگاه را طبقه‌بندی کرد.

در شکل ۳ توزیع ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای نشان داده شده است. در این نقشه پراکندگی ستبرا برای سنگ بستر لرزه‌ای از ۳ متر تا بیش از ۳۰ متر متغیر است. در شمال خاور و جنوب باختر منطقه مورد مطالعه ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای نسبت به نواحی دیگر کمتر است. در بخش‌های مرکزی ژرفای سنگ بستر بیش از ۳۰ متر است.

در شکل ۴ میانگین سرعت امواج برشی از سطح تا ژرفای ۳۰ متر نشان داده شده است. در این نقشه پراکندگی سرعت از ۴۰۵ متر بر ثانیه تا ۸۰۲ متر بر ثانیه متغیر است. همان‌طور که دیده می‌شود در شمال شهر مقادیر سرعت کم است و سرعت در جنوب‌باختری و بخشی از خاور روند افزایشی را نشان می‌دهد. در جهت شمال باختری به سمت جنوب خاوری و مرکز به سمت شمال خاوری مقادیر سرعت به نسبت متوسط است.

بر اساس جدول طبقه‌بندی نوع زمین استاندارد ۲۸۰۰ ایران (جدول ۱) و میانگین سرعت امواج برشی از سطح تا ژرفای ۳۰ متر و ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای، زمین شهر بم در نوع I و در بخش مرکز به سمت جنوب در نوع II طبقه‌بندی می‌شود.

۳-۲. بررسی‌های ژئوتکنیک

برای ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، بررسی‌های ژئوتکنیکی مناسب شامل حفر گمانه‌ها، انجام آزمون‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی است (Connecticut department of transportation, 2005). بدین منظور، پس از انجام مطالعات ژئوفیزیکی برای کسب اطلاعات و شناخت هر چه بیشتر از نوع و رفتار خاک تا ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای، بررسی‌های ژئوتکنیکی در قالب بررسی‌های سطحی و زیرسطحی، حفاری‌های ماشینی، چاهک‌های آزمایشی، نمونه‌برداری پیوسته، آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی انجام شد (شکل ۵). نقاط حفاری‌های ژئوتکنیکی به کمک نقشه تخریب شهر بم و اطلاعات حاصل از مطالعات لرزه‌ای، مشخص و مثلث‌بندی شدند. مثلث‌بندی به گونه‌ای صورت پذیرفت که گستره شهر بم مورد پوشش کامل قرار گیرد. بر این اساس در مجموع ۱۷ نقطه به عنوان نقاط حفاری ماشینی انتخاب شدند (شکل ۶). نقاط مورد نظر در مناطق با بیشترین و کمترین تخریب پراکنده هستند. به دلیل نیاز به شناخت دقیق و کامل از ویژگی‌های رفتاری خاک، حفاری به صورت خشک و مغزه‌گیری پیوسته صورت گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهند در مجموع ۱۰ نوع خاک به نام‌های SP(ماسه بد دانه‌بندی شده)، GP (شن بد دانه‌بندی شده)، SW-SM (ماسه لای‌دار خوب دانه‌بندی شده)، GM(شن لای‌دار)، CL(رس لاغر)، SC(ماسه رس‌دار)، SP-SM(ماسه لای‌دار بد دانه‌بندی شده)، GP-GM (شن لای‌دار بد دانه‌بندی شده) و SM (ماسه لای‌دار) در منطقه موجود است (ASTM D4318, 2005; ASTM D422, 2007). جنس چیره خاک در گمانه‌های مختلف ماسه لای‌دار (SM) است. به منظور انجام مشاهدات عینی درون چاهی و انجام آزمایش چگالی، در محل سه حلقه چاهک آزمایشی به ژرفای ۱۰ متر حفر شد.

با توجه به بالا بودن هزینه حفر گمانه‌ها و ضرورت پوشش کامل ناحیه مورد مطالعه، نتایج حاصل از عملیات ژئوتکنیکی و ژئوسایزمیک باید به نحو مناسبی با هم تلفیق شوند. برای مثال به منظور تعمیم هر چه بهتر اطلاعات به دست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌لرزه‌ای موجود در گستره شهر بم، روش‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفت. روش شبیه‌سازی گمانه‌ها به کمک نرم‌افزارهای Rock work و Arc GIS به همراه روش آماری فاصله معکوس وزنی (Inverse Distance Method (IDW))به عنوان بهینه‌ترین روش انتخاب شد. به کمک روش مورد نظر در مجموع ۵۷ گمانه شبیه‌سازی شد (Hashemi Tabatabaei et al., 2009). عمل شبیه‌سازی گمانه‌ها به گونه‌ای انجام شد که گستره مورد مطالعه را به طور کامل پوشش دهد(شکل ۶).

بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌ها، ۴ برش در جهت شمال- جنوب رسم و تغییرات لایه‌های خاک نسبت به ژرفا مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۷ روند توالی و تغییر لایه‌های زمین‌شناسی مهندسی در برش A-A' به طول تقریبی 5 km است نشان داده شده است. جنس چیره خاک در این برش، درشت دانه از نوع SM است. بخش شمالی و جنوبی، لایه‌ها توالی یکسانی ندارند. در بخش جنوبی ۹ لایه از بالا به پایین شامل SM ، SC/CL (ماسه رس‌دار یا رس لاغر)، SP(ماسه بد دانه‌بندی شده)، SM ،SC ،SC/SM (ماسه لای‌دار یا ماسه رس‌دار) و در بخش شمالی ۴ لایه شامل CL, SC/SM , CL و SM وجود دارند. لایه‌های مشابه در طول برش ستبرای تقریباً یکسانی دارند.

به منظور شناسایی روند تغییرات سرعت موج برشی و سنگ‌شناختی شهر بم در ژرفاهای مختلف اقدام به تهیه نقشه لایه‌های ژئوتکنیکی و سرعتی در ژرفاهای ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ متر شد. شکل ۸ پراکندگی سنگ‌شناختی در ژرفای ۱۵ متری در گستره شهر بم را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه پراکندگی خاک در ژرفای ۱۵ متر، جنس چیره خاک ماسه سیلتی است. انواع خاک به ترتیب کاهش پراکندگی عبارت است از: SM در بیشتر نواحی نقشه، SC/CL در شمال‌خاوری، SC/SM در بخش میانی جنوب، SW-SM/GW-GM (ماسه لای‌دار خوب دانه‌بندی شده یا شن لای‌دار خوب دانه‌بندی شده) در بخش میانی نقشه، SP-SM/SM (ماسه لای‌دار بد دانه‌بندی شده یا ماسه لای‌دار) در بخش‌های جنوب‌خاوری و شمال باختری، GM/SM (شن لای‌دار یا ماسه لای‌دار) شمال‌باختری، لایه سنگی در شمال‌باختر و در مجاورت لایه GM/SM پراکندگی دارد.

۴- مطالعات لرزه زمین‌ساخت و تحلیل خطر

نتایج این بررسی‌ها، تهیه منحنی‌های خطر برای شبکه منظمی از نقاط درون گستره و برآورد شتاب بیشینه افقی و قائم به صورت نقشه‌های پربندی و طیف‌های خطر یکنواخت در سطوح مختلف لرزه‌ای (DBE, MDE, MCE) در سنگ بستر است. به منظور برآورد زلزله محتمل با استفاده از عکس‌های هوایی، ماهواره‌ای، نقشه‌های موجود، بررسی‌های میدانی و پیشینه زلزله‌های رخ داده نقشه گسل‌های منطقه در شعاع حدود ۲۰۰ کیلومتری شهر بم (شکل ۹)تهیه شد (Ambraseys et al., 1982).

بررسی‌های زمین‌شناسی، داده‌های GPS و رویداد زمین‌لرزه اخیر در بم بیانگر جوان و جنبا بودن بیشتر گسل‌های پیرامون بم است، گسل جنوب بم که نزدیک‌ترین گسل به شهر بم است، نخستین بار پس از زمین‌لرزه، شناسایی شد و مورد بررسی‌های لرزه‌شناسی و رادار قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی امواج درونی زمین‌لرزه بم و همچنین داده‌های ماهواره بیانگر این است که هر دو گسل بم- براوات و گسل جنوب بم به هنگام زمین‌لرزه جنبش داشته‌اند (طالبیان و همکاران، ۱۳۸۹). اما بیشترین انرژی رها شده (حدود ۷۸%) ناشی از جنبش گسل جنوب بم است. این گسل درازای حدود ۲۰-۲۵ کیلومتر داشته و از جنوب به سوی مرکز شهر ادامه می‌یابد. گسیختگی گسل جنوب بم تا ژرفای حدود ۱۲کیلومتری ادامه می‌یابد و بیشترین لغزش آن به میزان حدود ۲/۵ متر در ژرفای حدود ۶ کیلومتری است (Talebian et al., 2004, Funning et al., 2005, Jackson et al., 2006).

به طور معمول تحلیل خطر زمین‌لرزه بر اساس کاتالوگ داده‌های زمین‌لرزه انجام می‌گیرد (Berberian, 1994). اما با توجه به کمبود داده‌های تاریخی و دستگاهی در منطقه بم، تحلیل خطر در این پروژه بر اساس نرخ جنبش گسل‌ها انجام گرفته است. در این روش نرخ جنبش گسل‌ها و یا زون‌های لرزه‌زا به وسیله داده‌های GPS در ترکیب با داده‌های زمین‌شناسی و سن‌سنجی مطلق برآورد شده و سپس این نرخ جنبش به نرخ گشتاور لرزه‌ای و سرانجام به ضرایب گوتنبرگ و ریشتر تبدیل و ادامه تجزیه به روش احتمالاتی و با استفاده از نرم‌افزار SEISRISK III انجام شده است.

با استفاده از منحنی‌های احتمالاتی برای متغیرهای مختلف مانند شتاب بیشینه زمین و دیگر متغیرهای حرکتی و بر اساس تعریف از زلزله طرح به عنوان سطح مورد استفاده در طراحی ساختمان‌ها (به عنوان مثال دوره بازگشت ۴۷۵ سال یا ۲۴۷۵ سال)، می‌توان پراکندگی شتاب و هر متغیر دیگر را برای نقاط مختلف شهر به‌دست آورد. برای مثال مقادیر بیشینه شتاب قائم و افقی و طیف خطر یکسان برای نقاط مختلفی از شهر بم محاسبه شده و به صورت نقشه‌های خطوط هم شتاب برای ۴ سطح احتمال ۵۰، ۱۰، ۵ و ۲ درصد در ۵۰ سال ارائه شده است. نقشه شتاب بیشینه افقی سنگ کف شهر بم با احتمال وقوع ۱۰% در ۵۰ سال در شکل ۱۰ و طیف خطر یکسان برای سنگ کف در یک نقطه از شهر بم درشکل ۱۱ نشان داده شده است.

۵- تحلیل پاسخ زمین و تعیین ویژگی‌های حرکتی

با استفاده از تحلیل پاسخ ساختگاه، پارامترهای لرزه‌ای و طیف‌های طرح برای شهر بم تعیین شدند. در این نوشتار، افزون بر مروری مختصر بر موارد زیر به نتایج مهم به‌دست آمده نیز اشاره می‌شود.

- ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های سطحی ناحیه در محل گمانه‌ها و نقاط تحلیلی، نیمرخ‌های ایده‌آل‌سازی شده و منحنی‌های رفتاری
- انتخاب نگاشت‌های (رکورد) زلزله و نحوه مقیاس کردن آنها
- روش تحلیل پاسخ ساختگاه
- نتایج حاصل از تحلیل و متغیرهای حرکت
- انتخاب مدل طیف طراحی و ارائه طیف‌های طراحی پیشنهادی

۵-۱. گمانه‌ها و نقاط تحلیلی، نیمرخ‌های ایده‌آل‌سازی و منحنی‌های رفتاری

تحلیل‌های پاسخ ساختگاه در ۶۸ نقطه شامل گمانه‌های ژئوتکنیکی و شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. به منظور برآورد، نوعی ساده‌سازی در نیمرخ گمانه‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی انجام شد. لایه‌های مختلف خاک در ۷ تیپ خلاصه شده است.

به دلیل دانه‌ای بودن لایه‌های خاک در ساختگاه و عدم امکان گرفتن نمونه‌های دست نخورده برای انجام آزمایش‌های دینامیکی و موجود بودن متغیرهایی همچون نوع خاک لایه‌ها، عدد SPT، نیمرخ موج برشی حاصل از روش درون چاهی در محل گمانه‌ها و سرعت موج برشی سطحی انجام شده، از منحنی‌های تجربی پیشنهاد شده در ادبیات فنی برای انتخاب منحنی‌های مناسب G/G0-γ و D-γ استفاده شده است. هر کدام از ۷ تیپ خاک، دارای دو منحنی غیر خطی برای G/G0-γ و D-γ هستند. علت این امر شباهت نسبی فیزیکی و مکانیکی لایه‌ها با همدیگر و نیز تغییرات تدریجی و افزایش سختی لایه‌ها با ژرفا و منحنی‌های موجود G/G0-γ و D-γ بوده است.

۵-۲. انتخاب نگاشت‌های تاریخچه زمانی و مقیاس کردن آنها

به منظور انجام عملیات تحلیل پاسخ ساختگاه و محاسبه طیف پاسخ بر روی سطح زمین لازم است تا نگاشت‌های مناسب در سنگ بستر لرزه‌ای انتخاب و به نیمرخ‌های ژئوتکنیکی مدل‌سازی شده، اعمال شود. بدین منظور با رعایت معیارهای حاکم بر انتخاب تاریخچه زمانی شتاب، ۱۴ نگاشت مناسب از مجموع هفت زلزله رخ داده در ایران و دیگر کشورها انتخاب شد. از معیارهای حاکم بر انتخاب تاریخچه زمانی شتاب می‌توان به شرایط زمین‌ساختی، شرایط ساختگاهی، بزرگای زلزله، فاصله محل ثبت نگاشت از مرکز زلزله مربوطه، ویژگی‌های نگاشت‌های میدان نزدیک و بیشینه شتاب زمین اشاره کرد. نگاشت‌ها به دو روش مقیاس کردن ساده و سازگار با طیف در حوزه بسامد مقیاس شده‌اند. در روش مقیاس کردن ساده، بیشینه شتاب تاریخچه زمانی‌های انتخابی به گونه‌ای مقیاس شده است که با مقادیر بیشینه شتاب زمین که

از مطالعات تحلیل خطر به‌دست آمده برابر شوند. در روش مقیاس کردن سازگار با طیف تاریخچه‌های زمانی انتخاب شده به گونه‌ای مقیاس می‌شوند که طیف پاسخ آنها در همه محدوده دوره تناوبی با طیف طراحی مورد نظر که از مطالعات تحلیل خطر به دست آمده است، تطابق بسیار نزدیکی داشته باشد.

۵-۳. روش تحلیل

در این بررسی‌ها ورودی‌های تحلیل شامل اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی و همچنین اطلاعات حاصل از آزمایش‌های ژئوفیزیکی به صورت تک‌نقطه‌ای به‌دست آمده‌اند. به منظور تعیین نحوه تأثیر لایه‌های سطحی زمین بر حرکت ورودی زلزله، تحلیل پاسخ زمین با روش خطی معادل انجام گرفته است. ابتدا حرکت‌های زمین برای سنگ بستر لرزه‌ای (ژرفایی که سرعت موج برشی زمین به بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه می‌رسد) انتخاب و مقیاس شده‌اند. سپس با اعمال حرکات انتخاب شده در سنگ بستر لرزه‌ای و استفاده از اطلاعات گمانه‌های حفر شده، حرکت در سطح زمین در نقاط مورد نظر با استفاده از روش خطی معادل با استفاده از نرم‌افزار PROSHAKE محاسبه شده است.

۵-۴. نتایج حاصل از تحلیل

با محاسبه طیف پاسخ حرکت در ۶۸ نقطه از سطح شهر بم برای سه دوره بازگشت مختلف ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال (احتمال ۱۰، ۵ و ۲ درصد در ۵۰ سال) و استخراج متغیرهای لازم، طیف‌های طراحی برای مناطق مختلف شهر قابل تولید است. در این بررسی‌ها، برای مقیاس کردن نگاشت‌ها از هر دو روش مقیاس ساده و سازگار با طیف در حوزه بسامد، استفاده شده است. در روش مقیاس ساده از بیشترین مقادیر شتاب و در روش سازگار با طیف از طیف‌های خطر یکنواخت حاصل از مطالعات تحلیل خطر زلزله استفاده شده است. طیف‌های طراحی و دیگر متغیرهای ارائه شده، بر اساس بیشترین مقادیر به‌دست آمده از دو روش انتخاب شده‌است.

۵-۵. پهنه‌بندی متغیرهای مختلف حرکت سطح زمین برای شهر بم

پهنه‌بندی متغیرهای مختلف حرکت در سطح زمین که با استفاده از تحلیل پاسخ ساختگاه برای نقاط مختلف شهر بم محاسبه شده‌اند شامل نحوه پراکندگی بیشینه شتاب سطح زمین، شتاب طیفی و سرعت طیفی در دوره‌های تناوب ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ثانیه و همچنین دوره تناوب متناظر با بیشترین تشدید و ضریب بزرگنمایی برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ ساله است. با استفاده از این نقشه‌ها به خوبی می‌توان نحوه تأثیر شرایط سطحی ساختگاه را بر متغیرهای حرکتی زمین ملاحظه کرد.

در شکل ۱۲ نقشه پراکندگی بیشینه شتاب افقی (PGA) در سطح زمین در دوره بازگشت ۴۷۵ سال نشان داده شده است. به طور کلی شتاب وارده به بخش خاوری بیش از بخش باختری بوده و وجود شتاب بیشینه در بخش مرکزی شهر قابل توجه است. روند افزایشی مقادیر شتاب از باختر به خاور بیانگر تأثیر گسل بم و پراکندگی افزایشی شتاب در امتداد شمال- جنوب با تمایل به شمال‌باختر تا حدودی بیانگر تأثیر ساختگاه در تشدید مقادیر شتاب است. این الگوی تغییر PGA کمابیش با پراکندگی شتاب محاسبه شده در رقوم سنگ کف لرزه‌ای، قابل انطباق است.

شکل ۱۳ نقشه پراکندگی دوره تناوب متناظر با بیشترین تشدید (T_n) در نقاط مختلف شهر بم را نشان می‌دهند. پراکندگی مقادیر این متغیر در سطح شهر، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی را تأیید می‌کند. T_n در بخش شمال‌خاوری کمترین مقادیر را دارد. این موضوع با واقعیت وجود برونزدهای سنگی در این ناحیه سازگار است. نقشه پراکندگی T_n نشان می‌دهد که بخش شمال‌خاوری شهر بم در مقایسه با دیگر بخش‌های دارای دوره تناوب پایین‌تری است. با این حال ناحیه شمال‌باختری- جنوب‌خاوری نیز که دارای ستبرای بیشتر رسوب است، در این نقشه نسبت به دیگر نواحی دارای دوره تناوب بیشتری است. همچنین با حرکت از نواحی شمالی به سمت جنوب دوره تناوب رسوب افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۴ نقشه پراکندگی ضریب بزرگنمایی در نقاط مختلف شهر نشان داده شده است. ضریب بزرگنمایی در بخش‌های خاوری شهر نسبت به بخش باختری آن مقادیر بیشتری را دارد. پراکندگی مقادیر بالای ضریب یاد شده در نوار شمال‌باختری- جنوب‌خاوری شهر را نیز باید به وجود لایه‌های رسوبی ژرف‌تر در این ناحیه نسبت داد که نتایج آزمایش‌های ژئوفیزیک و همچنین گمانه‌های ژئوتکنیکی در این ناحیه نیز آن را تأیید می‌کند. ضرایب بالای تشدید در نوار شمال‌باختری- جنوب‌خاوری شهر به خوبی با پراکندگی خرابی‌های زلزله سال ۱۳۸۲ بم مطابقت دارند.

۵-۶. متغیرهای طیفی و تولید طیف طرح

در این بررسی‌ها به منظور تعیین طیف طرح استاندارد از روش معرفی شده در دستورالعمل ATC -03-6 (ATC, 1978) استفاده شده است. این روش مبنای تهیه طیف استاندارد در آیین‌نامه‌های طراحی معتبری از جمله UBC97، (ICBO, 1997) IBC2003 (ICC 2006) و NEHRP2000 (BSSC, 2000) بوده است. شکل ۱۵ فرم طیف پیشنهادی این روش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود برای ساختن طیف استاندارد تعیین متغیرهای T_o، C_v، C_a و T_s ضروری هستند. متغیرهای طیف طراحی زلزله در سطح شهر بم شامل T_o، C_v، C_a و T_s به تفکیک به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی در دوره بازگشت‌های مختلف ارائه شده است. با استفاده از شکل کلی طیف استاندارد و نقشه‌های پهنه‌بندی این متغیرها می‌توان طیف طراحی در هر نقطه دلخواه را به‌دست آورد.

۵-۷. ارائه طیف‌های طراحی پیشنهادی

به منظور تسهیل در امر طراحی سازه‌های مختلف در شهر بم، با توجه به ویژگی‌های طیف‌های طراحی محاسبه شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال، محدوده مورد مطالعه شهر بم به چهار ناحیه کلی تقسیم شده که برای هر کدام از آنها به صورت جداگانه طیف‌های طراحی پیشنهاد شده است. محدوده هر کدام از این نواحی در شکل ۱۶ ارائه و طیف‌های طراحی در شکل ۱۷ به تفکیک برای هر ناحیه ارائه شده است.

۶- مقایسه نتایج بررسی‌ها با تخریب ناشی از زلزله

به منظور ارزیابی دقت بررسی‌های انجام شده، پراکندگی مقادیر PGA با نقشه تخریب مربوط به زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲ بم مقایسه شده است (شکل ۱۸). پراکندگی خرابی در شهر با متغیرهای به‌دست آمده برای جنبش نیرومند زمین در نواحی مختلف شهر تطابق خوبی دارد.

۷- مقایسه نتایج بررسی‌های ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای با استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه اروپا

همان‌طور که بیان شد بر اساس بررسی‌های ژئوسیسمیک، در عمده مناطق شهر سه لایه لرزه‌ای در نظر گرفته شد، اما در محدوده مشخص شده در شکل ۱۹، تنها ۲ لایه شناسایی شد. بنابراین، یک لایه کم سرعت بر روی لایه‌ای پر سرعت قرار گرفته است. از آن جایی‌که سنگ بستر لرزه‌ای کمتر از ۳۰ متر ژرفا دارد و میانگین سرعت موج برشی ۴۳۷ تا ۶۸۷ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است، بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰، زمین این محدوده در نوع زمین I طبقه‌بندی می‌شود. بر مبنای آیین‌نامه اروپا (CEN,2004)، زمین این محدوده بر اساس ستبرای لایه‌ها و سرعت موج برشی، از نوع زمین E است. اما بدون اعمال این ضوابط زمین محدوده یادشده، بر مبنای آیین‌نامه اروپا از نوع B است.

در شکل ۲۰ طیف‌های طراحی نواحی ۲ و ۳ بر مبنای بررسی‌های ریزپهنه‌بندی

لرزه‌ای شهر بم همراه با طیف‌های طراحی بر مبنای آیین‌نامه اروپا برای زمین‌های نوع B و E برای طیف نوع ۱ و همچنین طیف طراحی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ برای زمین‌های نوع I نیز رسم شده است. در جدول ۲ مقادیر بیشترین شتاب طیفی و محدوده زمان تناوب آن برای طیف‌های زمین‌های نوع B و E آیین‌نامه اروپا، زمین نوع I استاندارد ۲۸۰۰ و نواحی ۲ و ۳ ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای ارائه شده است.

بیشترین شتاب طیفی برای زمین نوع E بر مبنای آیین‌نامه اروپا، ۱/۰۵ g در محدوده زمان تناوب ۰/۱۵ تا ۰/۵ ثانیه است. بیشترین شتاب طیفی بر مبنای مطالعات ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای در نواحی ۲ و ۳ به ترتیب ۱/۲۲۵ g (در محدوده زمان تناوب ۰/۰۷۸ تا ۰/۳۹۳ ثانیه) و ۱/۰۰ g (در محدوده زمان تناوب ۰/۰۷۸ تا ۰/۳۹۳ ثانیه) است. در حالی‌که بیشترین شتاب طیفی برای زمین نوع B بر مبنای آیین‌نامه اروپا، ۰/۹۰ g در محدوده زمان تناوب ۰/۱۵ تا ۰/۵ ثانیه بوده و بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰، ۱/۲۲۵ g در محدوده زمان تناوب ۰/۱ تا ۰/۴ ثانیه است. همان‌گونه که دیده می‌شود، طیف حاصل از مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، تطابق مناسبی با طیف طراحی زمین نوع E بر مبنای آیین‌نامه اروپا دارد. طیف یاد شده اختلاف بیشتری نسبت به طیف طراحی زمین نوع B بر مبنای آیین‌نامه اروپا و بویژه نسبت به طیف طراحی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ برای زمین‌های نوع I، دارد. این موضوع بیانگر تأثیر زمین با ویژگی‌های زمین نوع E در طیف‌های طراحی بوده و موجب افزایش شتاب‌های طیفی با ثابت ماندن تقریبی محدوده زمان تناوب نسبت به زمین‌های نوع A و B است.

۸- نتیجه‌گیری

بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در شهر بم، بر اساس دقت متوسط تا زیاد بوده و در قالب بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت، لرزه‌خیزی و تحلیل خطر، بررسی‌های ژئوالکتریک، زمین‌لرزه‌ای، ژئوتکنیک، و ژئوتکنیک لرزه‌ای صورت گرفته است. از مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- بر اساس بررسی‌های لرزه‌زمین‌ساخت، گسل جنوب بم که نزدیک‌ترین گسل به شهر بم است برای نخستین بار شناسایی شد. در این بررسی‌ها مشخص شد هر دو گسل بم- براوات و گسل جنوب بم به هنگام زمین‌لرزه جنبش داشته‌اند و بیشترین انرژی رها شده (حدود ۷۸%) ناشی از جنبش گسل جنوب بم است.

-با استفاده از تحلیل خطر زلزله بر اساس نرخ جنبش گسل‌ها و تبدیل آنها به نرخ گشتاور لرزه‌ای و ضرایب گوتنبرگ و ریشتر، متغیرهای حرکتی زلزله به صورت احتمالاتی و قطعی در نقاط مختلف شهر تعیین شده است. منحنی‌های خطر برای شبکه منظمی از نقاط درون گستره شهر تهیه و شتاب بیشینه افقی و قائم به صورت نقشه‌های پربندی و طیف‌های خطر یکنواخت در سطوح مختلف لرزه‌ای در سنگ بستر ارائه شده است.

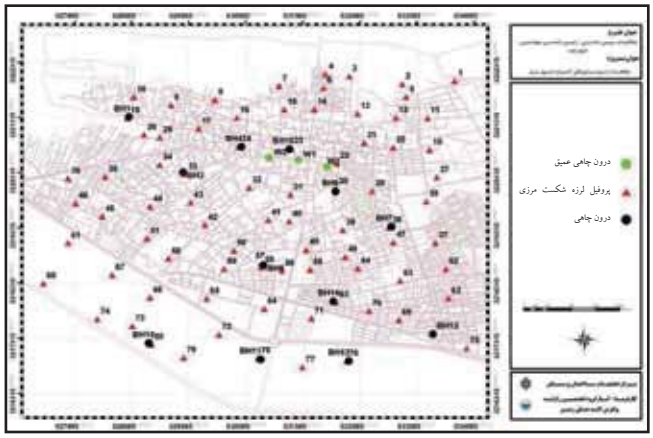
- براساس بررسی‌های ژئوسیسمیک و اندازه‌گیری امواج تراکمی و برشی هرکدام در ۸۰ نیمرخ به روش انکساری و در ۱۵ گمانه به روش درون چاهی، در بیشتر مناطق شهر بم ۳ لایه لرزه‌ای تا ژرفای ۳۰ متر در نظر گرفته و سرعت امواج تراکمی و برشی، ضریب پواسون و ضرایب دینامیکی در این لایه‌ها محاسبه شد. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران و میانگین سرعت امواج برشی از سطح تا ژرفای ۳۰ متر و ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای، زمین شهر بم به طور عمده در نوع I و در بخش مرکز به سمت جنوب در نوع II قرار می‌گیرد.

-در بررسی‌های ژئوتکنیکی در قالب حفاری‌های ماشینی در ۱۷ نقطه به صورت خشک و مغزه‌گیری پیوسته، چاهک‌های آزمایشی در ۳ نقطه، آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی، در مجموع ۱۰ نوع خاک در منطقه شناسایی شد. جنس چیره خاک ماسه‌سیلتی (SM) است. بر اساس بررسی‌های زمین‌لرزه‌ای و ژئوتکنیک، ۵۷ گمانه به کمک نرم‌افزارهای Rock work و Arc GIS با روش آماری فاصله وارون وزنی شبیه‌سازی شد.

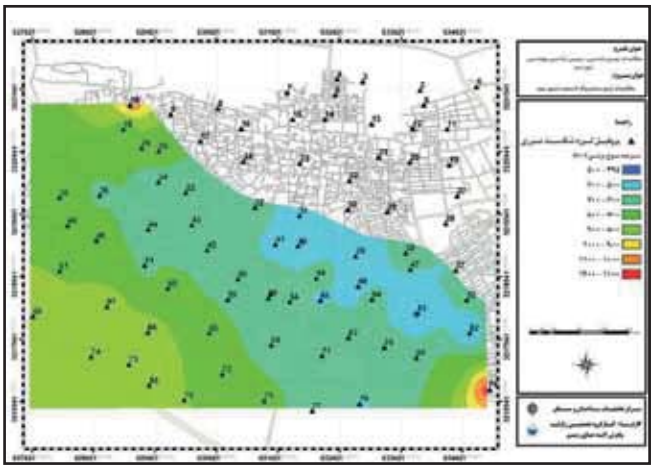
- تحلیل‌های پاسخ ساختگاه در ۶۸ نقطه شامل گمانه‌های ژئوتکنیکی و شبیه‌سازی شده و خلاصه‌سازی لایه‌های مختلف خاک آنها در ۷ تیپ، برای سه دوره بازگشت مختلف ۴۷۵، ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال، صورت گرفته است. هر کدام از ۷ تیپ خاک، دارای دو منحنی غیر خطی برای $G/G0-\gamma$ و $D-\gamma$ از منحنی‌های تجربی پیشنهاد شده در ادبیات فنی هستند. تحلیل پاسخ زمین به روش خطی معادل با انتخاب ۱۴ تاریخچه زمانی شتاب و مقیاس کردن آنها به دو روش ساده و سازگار با طیف در حوزه بسامد، انجام گرفته است.

- بر اساس تحلیل پاسخ ساختگاه، طیف پاسخ حرکت در نقاط یاد شده محاسبه شده است. با استفاده از نتایج حاصل، افزون بر پهنه‌بندی پارامترهای مختلف حرکت در سطح زمین شامل نحوه پراکندگی بیشینه شتاب سطح زمین، شتاب و سرعت طیفی، دوره متناظر با بیشترین تشدید و ضریب بزرگنمایی، متغیرهای لازم برای تولید طیف‌های طراحی مناسب نیز استخراج شده است. به منظور تسهیل در طراحی، محدوده مورد مطالعه شهر بم به چهار ناحیه کلی تقسیم شده که برای هر کدام از آنها به صورت جداگانه طیف‌های طراحی برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال پیشنهاد شده است.

- طیف حاصل از بررسی‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، تطابق مناسبی با طیف طراحی زمین نوع E بر مبنای آیین‌نامه اروپا دارد. طیف یاد شده اختلاف بیشتری نسبت به طیف طراحی زمین نوع B بر مبنای آیین‌نامه اروپا و بویژه نسبت به طیف طراحی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ برای زمین‌های نوع I دارد.



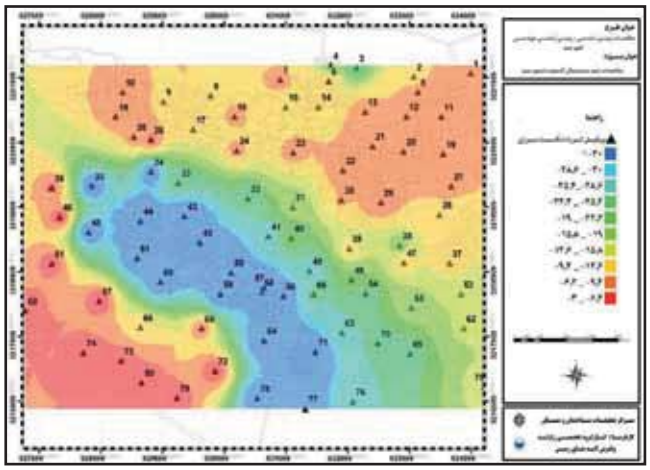
شکل۱- نقشه پراکندگی نیمرخ‌های انکساری، درون‌چاهی و درون‌چاهی ژرف در گستره شهر بم



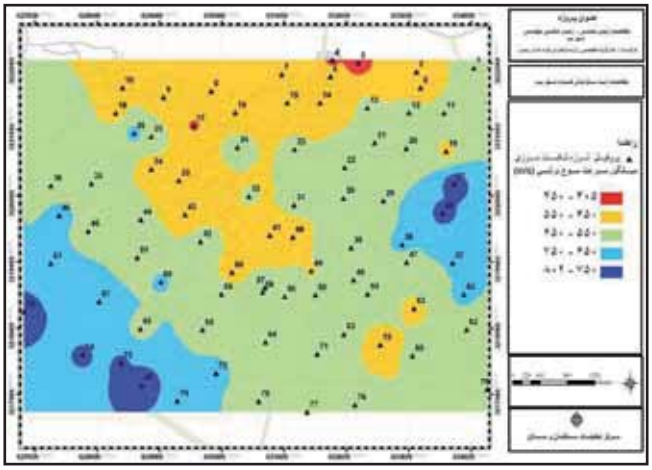
شکل۲- نقشه سرعت امواج برشی لایه دوم در گستره شهر بم

جدول۱- طبقه‌بندی زمین بر اساس استاندارد ۲۸۰۰

نوع زمین	مواد متشکل ساختگاه	حدود تقریبی $\overline{V}_s$ (متر بر ثانیه)
I	الف - سنگ‌های آذرین(دارای بافت درشت و ریزدانه)، سنگ‌های رسوبی سخت و بسیار مقاوم و سنگ‌های دگرگونی توده‌ای (گنایس‌ها -سنگ‌های متبلور سیلیکاتی) طبقات کنگلومرایی ب- خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ستبرای کمتر از ۳۰ متر از روی بستر سنگی	بیشتر از ۷۵۰ $۳۷۵ \leq \overline{V}_s \leq ۷۵۰$
II	الف- سنگ‌های آذرین سست (مانند توف)، سنگ‌های سست رسوبی، سنگ‌های دگرگونی متورق و به طور کلی سنگ‌هایی که بر اثر هوازدگی (تجزیه و تخریب) سست شده‌اند. ب- خاک‌های سخت (شن و ماسه متراکم، رس بسیار سخت) با ستبرای بیشتر از ۳۰ متر	$۳۷۵ \leq \overline{V}_s \leq ۷۵۰$
III	الف- سنگ‌های متلاشی شده بر اثر هوازدگی ب- خاک‌های با تراکم متوسط، طبقات شن و ماسه با پیوند متوسط بین دانه‌ای و رس با سختی متوسط	$۱۷۵ \leq \overline{V}_s \leq ۳۷۵$
IV	الف- نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد بر اثر بالابودن سطح آب زیرزمینی ب - هرگونه نیمرخ خاک که شامل دست کم ۶ متر خاک رس با شاخص خمیری بیشتر از ۲۰ و درصد رطوبت بیشتر از ۴۰ باشد.	کمتر از ۱۷۵

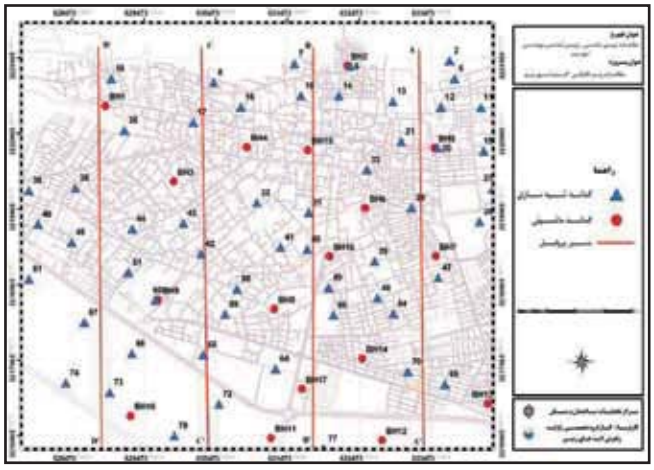


شکل ۳- نقشه پراکندگی ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای در گستره شهر بم

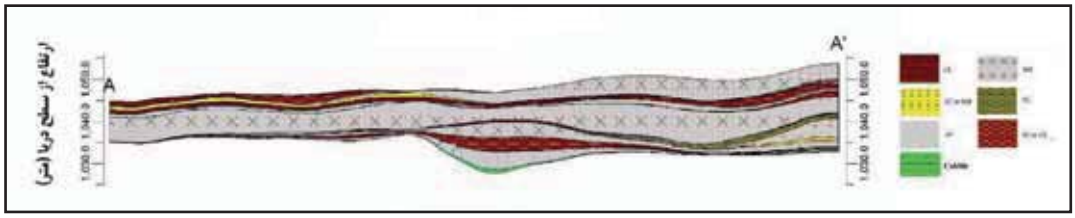


شکل۴- نقشه پراکندگی میانگین سرعت امواج برشی از سطح تا ژرفای ۳۰ در گستره شهر بم

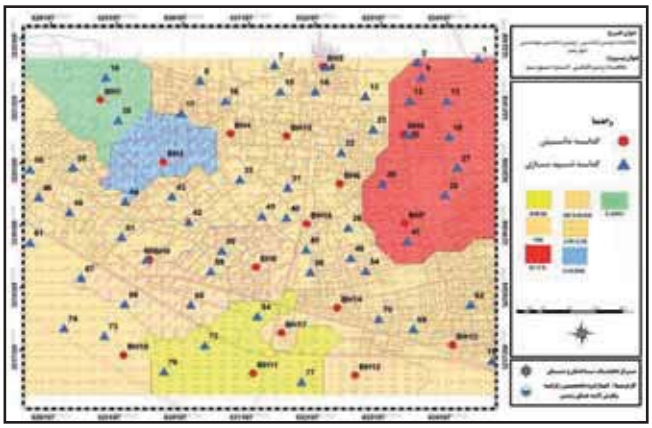
شکل۵- نمایی از الف) محل حفاری وب) مغزه‌گیری در ساختگاه مورد مطالعه



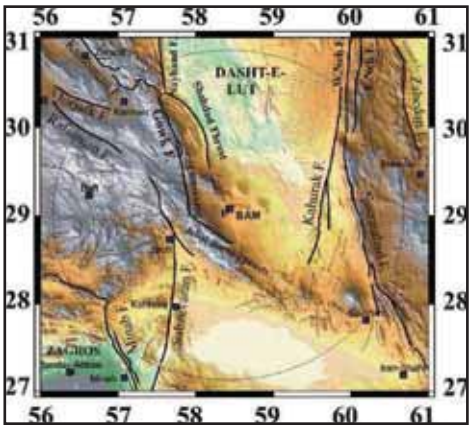
شکل۶- نقشه پراکندگی چاهک‌های دستی، گمانه‌های ماشینی و شبیه‌سازی شده و مسیر نیمرخ مقاطع در گستره شهر بم



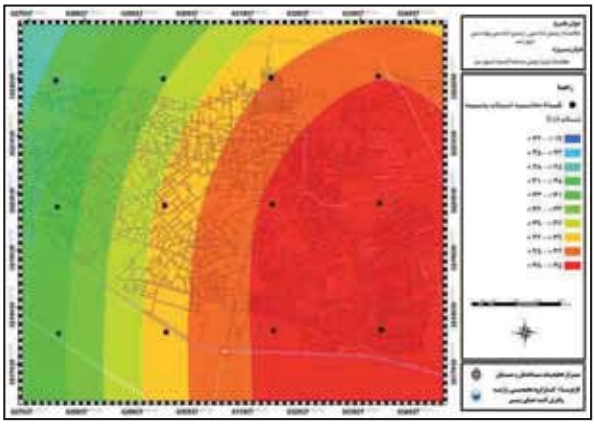
شکل۷- روند توالی و تغییر لایه‌های زمین‌شناسی مهندسی در برش عرضی A-A'



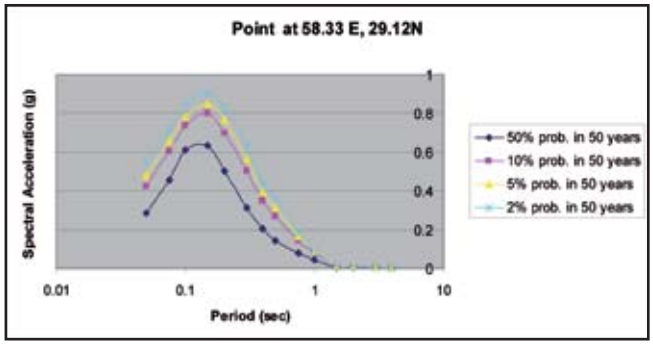
شکل۸- نقشه پراکندگی سنگ‌شناختی در ژرفای ۱۵ متری در شهر بم



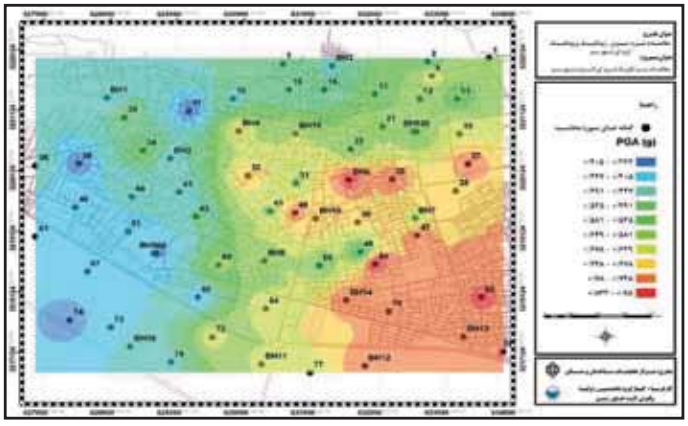
شکل۹- گسل‌های اصلی پیرامون بم(طالبیان و همکاران، ۱۳۸۹). دایره بزرگ محدوده شعاع ۲۰۰ کیلومتری پیرامون بم را نشان می دهد.



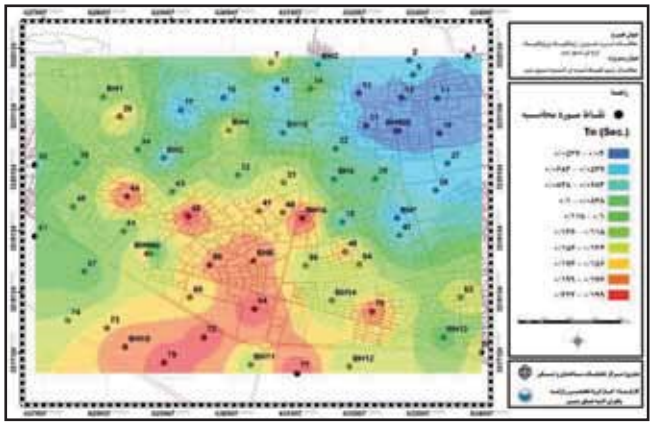
شکل۱۰- نقشه شتاب بیشینه افقی سنگ کف شهر بم با احتمال وقوع ۱۰% در ۵۰ سال



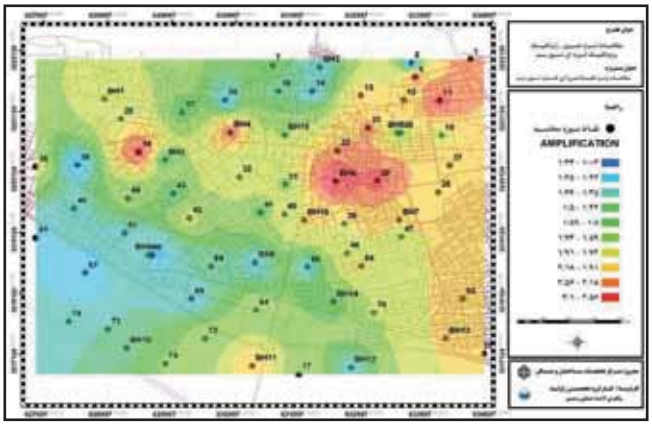
شکل۱۱- طیف خطر یکسان برای سنگ کف در یک نقطه از شهر بم



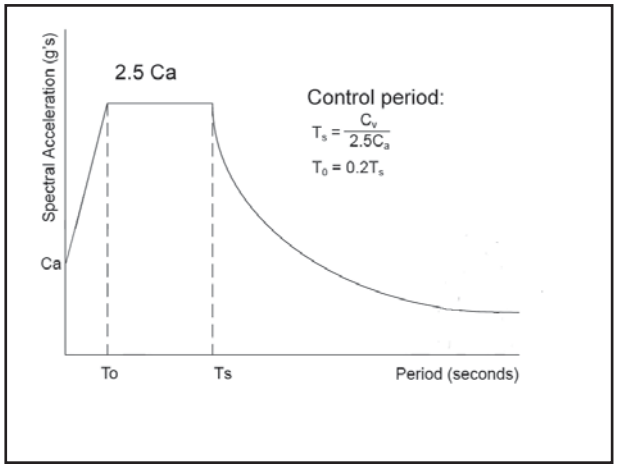
شکل۱۲- نقشه پراکندگی بیشینه شتاب سطح زمین در دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره شهر بم



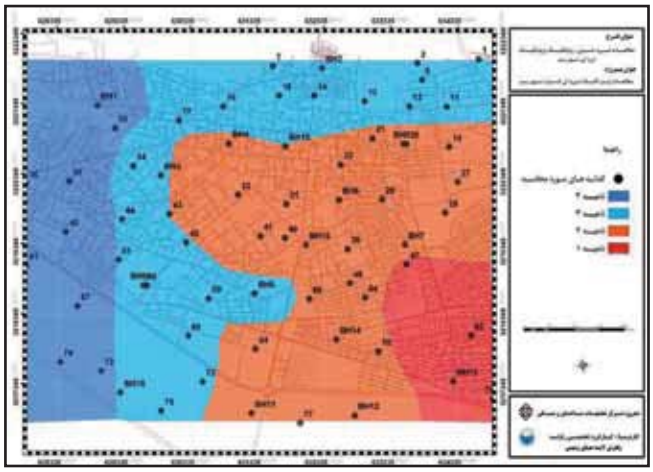
شکل۱۳- نقشه پراکندگی مقادیر دوره تناوب متناظر با بیشترین تشدید برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره شهر بم



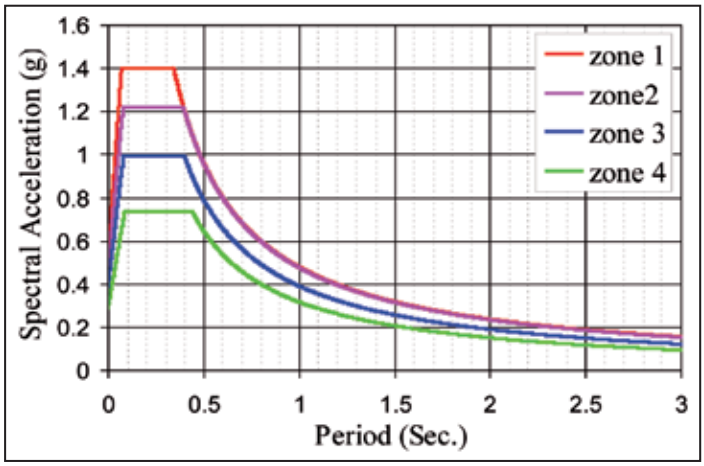
شکل۱۴- نقشه پراکندگی مقادیر شتاب ضریب بزرگنمایی دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره شهر بم



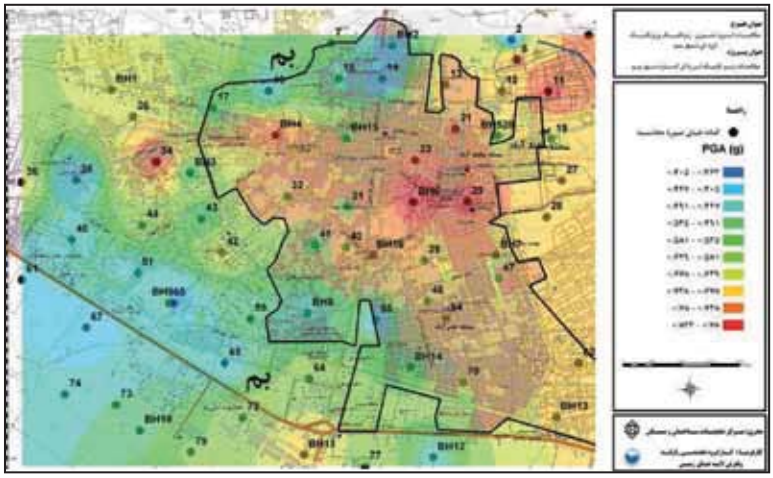
شکل۱۵- شکل کلی طیف طراحی پیشنهادی



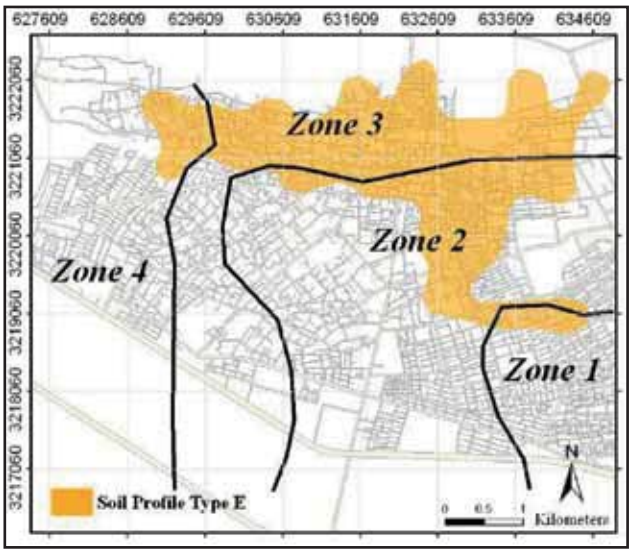
شکل۱۶- محدوده نواحی ۴ گانه ارائه طیف طراحی در شهر بم



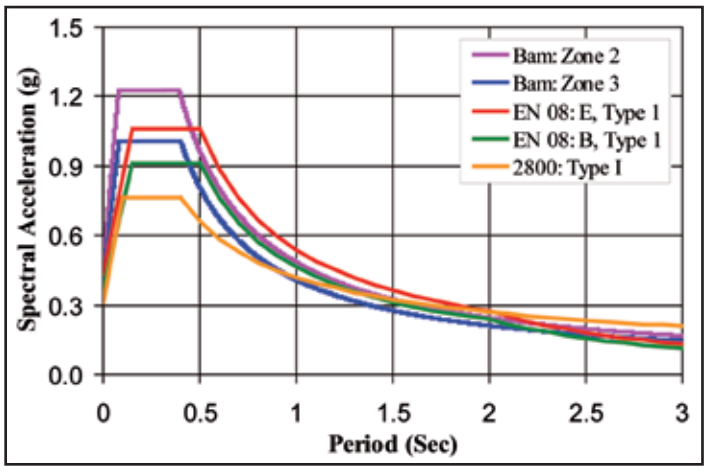
شکل۱۷- طیف‌های طراحی برای نواحی چهارگانه شهر بم دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل۱۸- پراکندگی خرابی در زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲ بم به همراه پراکندگی PGA دوره بازگشت ۴۷۵ سال در گستره شهر بم (ناحیه محصور به خطوط مشکی، خرابی‌های شدید و متوسط را نشان می‌دهد)



شکل۱۹- نواحی چهارگانه و محدوده زمین نوع E در شهر بم



شکل۲۰- مقایسه طیف‌های طراحی بر اساس آیین‌نامه اروپا، استاندارد ۲۸۰۰ و مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای برای شهر بم

کتابنگاری

کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

طالبیان، م.، هاشمی‌طباطبایی، س.، فتاحی، م.، قرشی، م.، بیت اللهی، ع.، قلندرزاده، ع. و ریاحی، م.ع.، ۱۳۸۸- برآورد نرخ لغزش گسله‌های پیرامون بم و کاربرد آنها در ارزیابی خطر زمین‌لرزه، مجله علوم‌زمین شماره ۷۴، زمستان ۱۳۸۸.

هاشمی‌طباطبایی، س.، فاطمی‌عقدا، م.، بیت‌الهی، ع.، سعید، ن.، محمدی، ا. س. و سلامت، ا. س.، ۱۳۸۸- راهنمای تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی برای ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در مناطق شهری، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

هاشمی‌طباطبایی، س.، قلندرزاده، ع.، ریاحی، م.ع.، طالبیان، م.، بیت‌اللهی، ع.، ۱۳۸۵- مطالعات لرزه‌خیزی، ژئوتکنیک و ژئوتکنیک لرزه‌ای شهر بم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

References

Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, UK, 219pp. Baker, C., 1993. The active seismicity and tectonics of Iran, Ph.D. thesis (unpublished), University of Cambridge, 228pp.

ASTM D422, 2007- Standard Test method for Particle Size Analysis of Soils, American Society for Testing and Materials.

ASTM D4318, 2005- Standard Test method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils, American Society for Testing and Materials.

ATC, 1978- Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings, ATC 3-06, Applied Technology Council, Palo Alto, California.

Berberian, M., 1994- Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran. Volume 1: Historical hazards in Iran prior to 1900. Int. Inst. Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, 603pp.

BSSC, 2000- NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings (and Other Structures from 1997), Building Seismic Safety Council, Washington, DC.

CEN, 2004- BS EN 1998 -1: 2004: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, ISBN: 0580458725.

Connecticut department of transportation, 2005- Geotechnical engineering manual, Connecticut department of transportation geotechnical engineering manual.

Funning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J., Jackson, J. A. & Fielding, E. J., 2005- Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam, Iran earthquake from Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar imagery, J. Geophys. Res., 110 (B9), B09406, doi:10.1029/2004JB003338

Hardage, B. A., 2000- Vertical Seismic Profiling, 14 A, Geophysical Press, Amsterdam.

Hashemi Tabatabaei, S., Salamat, A. S., Ghalandasrzadeh, A., Riahi, M. A., Beitollahi, A. & Talebian, M., 2009- Preparation of engineering geological maps of bam city using geophysical and geotechnical approach, Journal of earthquake engineering (Under press).

Hawkins, L. V., 1961- the reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations: Geophysics, 26, 806-819.

ICBO, 1997- UBC (Uniform Building Code), International Conference of Building Officials.

ICC, 2006- IBC (International Building Code), International Code Council, Falls church.

Jackson, J., Bouchon, M., Fielding, E., Funning, G., Ghorashi, M., Hatzfeld, D., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Talebian, M., Tatar, M., Walker, R. & Wright, T., 2006- Seismotectonic, rupture process and earthquake hazard aspects of the 26 December 2003 Bam earthquake, Geophys. J. Int.., 166, 1270-1292.

Japan Road Association, 2002- Specification of Highway Bridge, Part V Seismic Design, P. 28.

Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R., Wright, T. J., 2004- The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault, Geophys. Res. Lett., 31 (11), L11611, doi:10.1029/2004GL020058.

TC4- ISSMGE- 1999- Manual for zonation on seismic geotechnical hazard, Revised edition, Technical Committee for earthquake geotechnical engineering (TC4) of the International Society of soil mechanics and geotechnical engineering (ISSMGE), 209 p.

Dynamic Analysis of Fractures in North of Torud – Moalleman Area (Central Iran, East South of Damghan)

A. Keynezhad [1*], M. Pourkermani[2], M. Arian[1], A. Saeedi[3] & M. Lotfi[3]

[1] Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Research and Science Campus, Tehran, Iran

[2] Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

[3] Research Institute of Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2009 January 11 Accepted: 2009 August 16

Abstract

Detailed geological and structural analysis of north of Torud-Moalleman area (Central Iran), between Anjilu fault in north and Torud fault in the south, led to tectonic elements of this limit such as fractures and relative of their mechanism with left lateral sheared zone of two main faults. This study provides a movement system of Chalu, Gandi and Hafez faults in this shear zone. On the basis of kinematics findings and using general methods of fault slip analysis (orientation of slip plane, slip vector, shape of stress ellipsoid and angle of internal friction) region stress field were calculated after determining the angle of internal friction for each one of fault limits. Then, the main stress orientation determinates for combination data that values of σ_1 ، σ_2 , σ_3 were 195/10, 339/78 and 104/07 respectively. The shape of stress ellipsoid was defined on the basis of shape factor, [$R= (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$], (Angelier, 1975). The R-value for whole studied regions was about 0.5 and deformation type was mainly left lateral transpressional with reverse component. Such results are evident from N-NE (N195) trending σ_1 in the region and northward movement of the lithosphere. These finding are in line with field research results of fractures, faults and mechanism in this general shear zone.

Key words: Fracture, Dynamic Analysis, Torud, Stress, Central Iran, Moalleman

For Persian Version see pages 3 to 16

*Corresponding author: A. Keynezhad; E-mail: anahita.keynezhad@gmail.com

Multi Disciplinary Approach for Seismic Microzonation of Bam City

S. Hashemi Tabatabaei[1*], A. Mohamadi[1] & A. S. Salamat[1]

[1] Building and Housing Research Center, Tehran, Iran.

Received: 2010 January 31 Accepted: 2010 July 31

Abstract

Earthquake struck Bam city on 12/26/2004. Seismic microzonation of Bam city started with the aim to determine engineering geological and geotechnical characteristic in order to reduce the future earthquake disasters. The seismic microzonation included geoelectric, geoseismic, geotechnic, seismotechtonic, hazard analysis and geotechnical earthquake engineering. Based on seismic results and Standard No. 2800, Bam city can be classified as "Site class I" and " II" .Depth of the seismic bedrock throughout the city approximately is less than 30 m except some portion of central part. The subsurface geotechnical investigation was carried by continuous coring, ten types of soil were identified and their surface and subsurface distributions were mapped. Site response analysis was performed to determine various parameters such as peak acceleration, period corresponding to maximum resonance and coefficient of amplification for various return periods throughout the study area. Results indicated that Bam city can be divided in to four zones with different designed spectra. Some of the design spectra of Bam city were compared with Eurocode and Standard No. 2800.

Keywords: Seismic micozonation, Bam earthquake, Soil type, Motion parameters, Design spectrum

For Persian Version see pages 17 to 26

* Corresponding author: S. Hashemi Tabatabaei; E- mail: htabatabaei@bhrc.ac.ir