



دانشگاه صنعتی امیر کبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۴۹ تا ۶۱  
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 49-61



نشریه علمی - پژوهشی امیر کبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)

Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## تحلیل خطر احتمالاتی با اعمال اثرات رفتار غیرخطی خاک

سامان یغمایی سابق<sup>۱\*</sup>، رویا مطلب زاده<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت ۱۳۹۰/۵/۱۰، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۱۴)

### چکیده

مطالعات انجام شده در خصوص رفتار خاک، بیانگر این واقعیت است که لایه‌های خاک تحت اثر زلزله‌های قوی بیشتر وارد محدوده رفتار غیرخطی می‌شوند. این در حالیست که در تحلیل خطر متداول، رفتار خاک به صورت خطی فرض می‌شود. این مقاله سعی دارد طیف خطر بر روی بستر سنگی را با منحنی‌های تشدید حاصل از تحلیل‌های دینامیکی برای تهیه طیف ویژه ساختگاه ترکیب نماید. بدین منظور ساختگاه‌های مختلف با مشخصات دینامیکی مشخص و قطعی در دو شهر تبریز و تهران انتخاب و تحلیل خطر احتمالاتی در این مناطق با اعمال اثرات غیرخطی خاک انجام شده است. در ادامه با استفاده از ضرایب ارائه شده براساس مدل‌سازی مونت کارلو و در مرحله بعدی به کمک تحلیل دینامیکی و دستیابی به منحنی تشدید، طیف پاسخ ویژه ساختگاه محاسبه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، در صورتیکه مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک مشخص و قطعی نباشند، روش پیشنهادی براساس مدل‌سازی مونت کارلو با دقت خوبی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

### کلمات کلیدی

تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای، رفتار غیرخطی خاک، طیف ویژه ساختگاه، منحنی تشدید.

\* نویسنده مسئول و عهد دار مکاتبات Email: s\_yaghmaei@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

رومیوتی و برسو در سال ۲۰۰۳ با مقایسه رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های مختلف از زمین‌لرزه ۱۹۹۹ چی‌چی تایوان ( $M_w=7.6$ ) با رکوردهای شبیه‌سازی شده، به بررسی رفتار غیرخطی خاک و تشدید امواج لرزه‌ای در ساختگاه‌های مختلف پرداختند [۶]. نتایج حاصل از تحقیقات پاولنکو و ون رفتار غیرخطی لایه‌های خاک تحت اثر این زمین‌لرزه را بهتر به تصویر کشاند [۷].

با توجه به اهمیت موضوع، زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله به مطالعات گسترده‌ای در زمینه اعمال اثر شرایط محلی خاک بر حرکات نیرومند زمین پرداخته‌اند. از مطالعات اولیه که به صورت تجربی و با داده‌های محدودی انجام شده است، می‌توان به پژوهش‌های سید و همکاران اشاره نمود. آنها در سال ۱۹۷۶ و براساس مطالعات آماری، رابطه‌ای بین شتاب حداکثر روی بستر سنگی و شتاب حداکثر روی سطح زمین بدست آوردند [۸]. این مطالعات روی ۱۴۷ رکورد از زمین‌لرزه‌های رویداده در ایالات متحده، با بزرگی در حدود ۶٫۵ انجام شده است. براساس این مطالعات، تا تراز 0.1g بیشینه شتاب روی خاک بیش‌تر از بیشینه شتاب روی بستر سنگی بوده و در ترازهای بالاتر این نسبت برعکس می‌شود.

نکته قابل توجه دیگر اینکه، خاک منطقه، نه تنها باعث تغییر در عوامل حداکثر حرکت می‌شود، بلکه محتوی فرکانسی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، سید و همکاران، طیف پاسخ چهار منطقه با مشخصات متفاوت را مورد بررسی قرار داده و به تشدید شدید در ساختگاه‌های عمیق و نرم دست یافتند. سپس در سال ۱۹۹۰ ادیس رابطه‌ای تجربی بین شتاب حداکثر بستر سنگی و سطح زمین ارائه نمود که بیانگر افزایش میزان تشدید در شتاب‌های کم است [۹]. اگرچه روش‌های تجربی نقش بسیار اثرگذار و مهمی داشته‌اند، اما این روش‌ها محدوده‌ی بسیار کوچکی از داده‌ها را تحت پوشش قرار می‌دهند و از این رو، نتایج حاصل را نمی‌توان در تمامی طراحی‌های لرزه‌ای بکار گرفت. در این راستا، پژوهشگرانی مانند کرامر، برای اعمال اثرات غیرخطی خاک روی تاریخچه زمانی حرکت به مدل‌سازی‌های عددی با محدوده کاربرد وسیع‌تر روی آوردند [۱]. با توجه به اهمیت موضوع، پژوهشگرانی مانند آبراهامسون و سیلوا، پارک، بازارو و کرنل، پارک و هشاش، نگرش-های مختلفی به این مسئله داشته و راهکارهای متعددی برای اعمال اثرات غیرخطی خاک در تحلیل پاسخ ساختگاه پیشنهاد نموده‌اند [۱۰-۱۴].

در این مقاله، با توجه به رفتار غیرخطی خاک و اثر قابل-توجه آن بر طیف پاسخ، دیدگاه‌های مختلف موجود در این زمینه به اختصار توضیح داده شده است. سپس ساختگاه‌های مختلف با مشخصات دینامیکی مشخص و قطعی در دو شهر تبریز و تهران

توجه روزافزون به مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله و مطالعات گسترده در این زمینه، از این حقیقت مهم سرچشمه می‌گیرد که بتوانیم اثرات مخرب جانی و مالی این پدیده را به حداقل برسانیم. ایران با قرار گرفتن روی مسیر کمربند زلزله آلپ- هیمالیا، یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان به شمار می‌رود و از این رو، طراحی و اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. هدف از طراحی مقاوم در برابر زلزله، احداث سازه یا تأسیساتی است که بدون صدمات زیاد بتوانند در برابر شدت مشخصی از لرزش‌ها مقاومت نمایند. این شدت مشخص لرزش می‌تواند در قالب طیف طراحی تعریف شود [۱]. در آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در ایران (استاندارد ۲۸۰۰) [۲]، طیف طرح ارتجاعی استاندارد از حاصل ضرب طیف ضریب بازتاب ساختمان (B)، در شتاب مبنای طرح (A) حاصل می‌شود. این مقادیر، تابع نوع خاک و سطح خطر لرزه‌ای هستند که هر یک، به چهار دسته‌ی عمومی تقسیم شده‌اند. آنچه مسلم است طیف حاصل نمی‌تواند به تنهایی تصویر روشن و کاملی از تحلیل خطر منطقه ارائه دهد. بنابراین، برای بدست آوردن نتایج دقیق‌تر، انجام مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای با در نظر گرفتن شرایط تک‌تونیکی ساختگاهی امری ضروری است.

در تحلیل خطر لرزه‌ای متداول، بیشتر اثر لایه‌های خاک به صورت کلی و بدون توجه به اثرات غیرخطی آن اعمال می‌شود، درحالی‌که این مهم، نقش بسزایی در تعیین خصوصیات حرکت زمین دارد و خرابی‌های بجا مانده در نقاط مختلف جهان گواه این مطلب است. به عنوان مثال می‌توان به اثر قابل‌توجه رفتار خاک بر روی شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا ( $M_w=7.1$ )، در دو ایستگاه لرزه‌نگاری مختلف (یکی بروند سنگی و دیگری روی ساختگاه ماسه ای سست) اشاره نمود. نتایج حاصله بیانگر افزایش شتاب طیفی در ساختگاه ماسه‌ای است. شواهد موجود دیگر نشان از رفتار غیرخطی خاک در زمین‌لرزه ۱۹۹۴ نورتریج ( $M_w=6.7$ ) دارد. در سال ۱۹۹۶ تریفوانک و تودوروسکا با ارائه چهار رابطه کاهندگی برای حرکات افقی و عمودی و دو نوع خاک نرم و سخت، به مطالعات اثرات ساختگاهی پرداختند [۳]. در سال ۱۹۹۹ کولترا و همکاران مطالعاتی برای بررسی اثرات غیرخطی خاک بر ویژگی‌های مختلف حرکت زمین با استفاده از طیف فوریه انجام دادند [۴]. در سال ۲۰۰۲ پاولنکو و ایریکورا با مقایسه رفتار سه ساختگاه مختلف در اثر اعمال زمین‌لرزه کوبه به این نتیجه دست یافتند که رفتار دینامیکی غیرخطی خاک با میزان آگونگی افزایش می‌یابد [۵].

لرزه خیزی آن منطقه (توزیع گسل‌ها، زمین‌لرزه‌های تاریخی ثبت شده و غیره) بدست آورد. طیف خطر عبارت است از تغییرات شتاب طیفی  $S_a(f, \xi)$  در یک فرکانس خاص ( $f$ ) و با یک میرایی خاص ( $\xi$ ) در برابر شدت تجاوز سالیانه ( $\lambda$ ) و یا میانگین دوره بازگشت زلزله ( $MRP$ ). خطرات لرزه‌ای در شرایطی که زلزله مشخصی مدنظر باشد، به صورت قطعی تحلیل می‌شود. گسترش استفاده از مفاهیم احتمالات از یک سو و غیر اقتصادی بودن تحلیل خطر قطعی از سوی دیگر، باعث شکل‌گیری روشی با پایه و اساس به طور کامل احتمالاتی و آماری که در آن، زمان، اندازه و مکان زلزله قطعی نیست، شده است. روش احتمالاتی که امروزه کاربرد وسیع دارد، نخستین بار در سال ۱۹۶۸ توسط کرنل پیشنهاد شد که وقوع زلزله را با توزیع تصادفی پواسون مدل نموده است [۱۷]. در این روش، ارزیابی خطرات لرزه‌ای براساس آزاد شدن انرژی لرزه‌ای از منابع مختلف به صورت مستقل و مجزا انجام می‌شود. در این روش، نوع خاک منطقه صرفاً در مرحله استفاده از رابطه کاهندگی اعمال می‌شود. هر چند استفاده از روابط کاهندگی عمومی برای اعمال اثرات خاک برای دستیابی به طیف خطر فرض مناسبی تلقی می‌شود، با این حال مطالعات اخیر نشان می‌دهد، این روابط، نتایج دقیقی را در پی ندارد؛ زیرا پاسخ خاک در حین جنبش‌های نیرومند زمین وارد محدوده رفتار غیرخطی می‌شود، در حالی که بسیاری از روابط کاهندگی مورد استفاده، فقط تأثیر رفتار خطی خاک را با دخالت دادن یک ضریب ساده در نظر می‌گیرند. به عنوان مثال در رابطه کاهندگی کمپل و بزرگ‌نیا عمق سنگ پایه ملاک عمل قرار گرفته است [۱۸]. بور و جوینر برای اعمال اثرات خاک، میانگین سرعت موج برشی تا عمق سی متری،  $\sqrt{V_{30}}$  را در روابط خود اعمال نمودند [۱۹]. این دو مدل تفاوتی در تشدید لرزش در بستر سنگی سخت و ملایم قائل نیستند؛ بنابراین هیچ‌گونه اثری از رفتار غیرخطی خاک وارد معادلات نمی‌شود [۱۳]. از میان روابط کاهندگی متعدد، تنها رابطه‌ای که با افزودن یک عامل اضافی به رابطه کاهندگی، به اعمال اثر رفتار غیرخطی خاک می‌پردازد، رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا می‌باشد [۱۰] که در این مقاله با عبارت ABS-SN97 نشان داده شده است. در این رابطه، برای اعمال رفتار غیرخطی خاک، شتاب بستر سنگی حداکثر مورد انتظار یعنی  $\overline{pga}_{rock}$  بکار رفته است.

راهکاری دیگر برای تخمین طیف خطر سطح زمین، تولید رابطه کاهندگی مختص ساختگاه، با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی خاک و مشخصات خاص منطقه و استفاده از آن در تحلیل خطر احتمالاتی می‌باشد. این روش در سال ۲۰۰۰ توسط سیلوا [۱۱]، پیشنهاد شده و در سال ۲۰۰۴ توسط بازارو و کرنل مورد بررسی جامع‌تر قرار گرفته است [۱۳].

انتخاب و تحلیل خطر احتمالاتی در این مناطق با اعمال اثر غیرخطی خاک انجام شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از ضرایب ارائه شده براساس مدل‌سازی مونت کارلو و در مرحله بعد به کمک تحلیل‌های دینامیکی و دستیابی به منحنی تشدید، طیف پاسخ ویژه ساختگاه برای مناطق مورد مطالعه ارائه و نتایج کار با هم مقایسه شده است.

## ۲- بررسی رفتار خاک در برابر بارهای لرزه‌ای

لایه‌های مختلف خاک دارای رفتاری پیچیده و در برخی موارد ناشناخته در برابر بارهای دینامیکی هستند. از طرفی، تجارب زلزله‌های گذشته نشان داده است که نحوه توزیع خسارات، به مقدار زیادی وابسته به رفتار خاک در برابر بارگذاری دوره‌ای است. بنابراین بحث روی میزان و نحوه اثر رفتار خاک به صورت جدی مطرح است. به طور عمده مدل‌های ژئوتکنیکی، روابط تنش-کرنش خاک‌ها را غیرخطی و هیسترتیک نشان می‌دهد؛ تخمین صحیح از این روابط، تصویری واضح از رفتار لایه‌های خاک را ارائه می‌دهد. خواص از خاک‌ها که پدیده انتشار امواج و سایر پدیده‌های تحت کرنش برشی بیشتر از  $10^{-5}$  را تحت اثر قرار می‌دهند، خواص دینامیکی خاک نامیده می‌شوند؛ که شامل سختی، میرایی و ضریب پواسون هستند. در این میان، سختی و میرایی اهمیت بیشتری نسبت به بقیه دارد که این اهمیت در مسائل مربوط به ژئوتکنیک لرزه‌ای چندین برابر می‌شود. در بررسی روش‌های مختلف تحلیل پاسخ لرزه‌ای خاک، توجه به تغییر شکل‌های در حین وقوع زلزله اهمیت ویژه‌ای دارد. در صورتیکه حرکات لرزه‌ای از نظر شدت ضعیف باشند، کرنش برشی لایه‌های خاک کمتر از  $10^{-5}$  درصد بوده و رفتار به صورت الاستیک است [۱۵]. در این حالت می‌توان برای تحلیل دینامیکی از مدل الاستیک خطی استفاده نمود. در محدوده کرنش‌های بزرگتر رفتار خاک به صورت غیرخطی است. در این حالت تحلیل دینامیکی لایه‌های خاک، براساس مدل‌های غیرخطی و یا خطی معادل انجام می‌پذیرد.

## ۳- روش‌های اعمال اثرات رفتار غیرخطی خاک در

### تحلیل ویژه ساختگاه

امروزه در بسیاری از مناطق زلزله‌خیز دنیا زمین‌لرزه مهم‌ترین عامل در طراحی سازه‌ها و تأسیسات به شمار می‌رود. تحلیل خطر لرزه‌ای در واقع، پیش‌بینی اثر زمین‌لرزه مورد انتظار در محلی خاص می‌باشد [۱۶]. به عبارت بهتر، با تحلیل خطر لرزه‌ای برای منطقه‌ای خاص، می‌توان منحنی‌های خطر لرزه‌ای و طیف خطر یکنواخت ( $UHS$ ) را با توجه به

پرداخته‌اند. در بخش ۶ و ۷ دو روش احتمالاتی ارائه شده توسط بازار و کرنل تحت عناوین اصلاح رابطه کاهندگی و کانوولوشن، برای دستیابی به خطر لرزه‌ای سطح زمین توصیف شده است.

#### ۵- محاسبه منحنی تشدید

منحنی تشدید  $AF(f)$  با اعمال تعدادی رکورد واقعی ثبت شده بر روی بستر سنگی به مدل لایه‌های خاک محل ساختگاه بدست می‌آید. بازار و کرنل برای دستیابی به تخمین قابل قبولی از پاسخ غیرخطی خاک، از برنامه "سامدس"<sup>۳</sup> استفاده نموده‌اند [۲۰]. "سامدس"، برنامه‌ای المان محدودی است که براساس اصول تنش مؤثر، حرکت قائم و مدل‌سازی سختی مصالح فرمول‌بندی شده است. یکی دیگر از برنامه‌های پرکاربرد در خصوص اعمال اثر لایه‌های خاک و دستیابی به پاسخ خاک، برنامه "شیک"<sup>۴</sup> [۲۱] است که برخلاف برنامه سامدس براساس مدل خطی معادل شکل گرفته و کاربرد آن بسیار ساده‌تر است. در این مقاله برای محاسبه منحنی تشدید از برنامه شیک استفاده شده است. گفتنی است مقدار کرنش برشی مؤثر در تحلیل خطی معادل با اعمال ضریب ۰.۶ لحاظ شده است.

بازار و کرنل، برای اعمال عدم قطعیت در حرکت ورودی زمین، تعداد رکوردهایی بیشتر از آنچه در تحلیل دینامیکی متداول مورد نیاز است، مورد استفاده قرار دادند. داده‌های آن‌ها شامل ۷۸ شتاب‌نگاشت ثبت شده بر روی بستر سنگی از ۲۸ زلزله مختلف می‌باشد که بین سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۹۵ روی داده‌اند. در انتخاب این شتاب‌نگاشت‌ها توجه خاصی به نزدیک یا دور بودن منبع لرزه‌ای مبذول نشده است. بزرگی رکوردهای مورد استفاده در محدوده‌ی ۵ تا ۷.۴ می‌باشند و کوتاه‌ترین فاصله ایستگاه لرزه‌نگاری و محل شکست از صفر تا ۱۴۲ کیلومتر تغییر می‌یابد.

بازار و کرنل برای تخمین  $AF(f)$  دو حالت قطعی<sup>۵</sup> و تصادفی<sup>۶</sup> را برای تخصیص مشخصات دینامیکی ستون خاک بکاربرده‌اند [۱۳]. در حالت اول تمامی مشخصات و عوامل دینامیکی لایه‌های خاک مشخص و قطعی بوده و برابر مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه هستند؛ در حالت دوم خواص دینامیکی خاک منطقه برای مشاهده اثرات تغییر در مشخصات لایه‌های خاک بر منحنی تشدید، نامعلوم فرض شده‌اند. مشخصات هر مدل در حالت تصادفی، ترکیب‌های مختلفی از مقادیر قابل قبول عوامل خاک می‌باشد که با مدل‌سازی مونت کارلو بدست آمده‌اند. عوامل خاک با تغییر دادن مشخصات دینامیکی مصالح در ستون‌های مختلف خاک بدست می‌آید.<sup>۷</sup> مقایسه منحنی‌های تشدید بدست آمده در حالت‌های تصادفی و قطعی، بیانگر این مطلب است که منحنی تشدید در حالت تصادفی الگوی مناسبی در مقایسه با حالت قطعی دارد [۲۲].

در دیدگاهی دیگر، اثرات غیرخطی خاک به طور مستقیم روی منحنی خطر و طیف پاسخ اعمال می‌شود. از جمله تحقیقاتی که امروزه در این زمینه انجام شده می‌توان به روش‌های تحلیل خطر غیرخطی<sup>۱</sup> و کانوولوشن<sup>۲</sup> که به ترتیب توسط پارک و هشاش [۱۴] و بازار و کرنل [۱۳] ارائه شده اشاره نمود. یکی از مزایای روش کانوولوشن، این است که با استفاده از آن، حتی برای ساختگاهی که مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک آن مشخص و قطعی نباشد نیز می‌توان با دقت کافی طیف خطر سطح زمین را بدست آورد. در این مقاله دقت استفاده از این روش به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۴- بررسی کلیات روش بازار و کرنل ۲۰۰۴

شدت و محتوی فرکانسی حرکت در سطح زمین به طور عمده به مشخصات لایه‌های خاک ساختگاه بستگی دارد. در عین حال، در بسیاری از موارد، پروفیل خاک و عوامل کنترل کننده رفتار دینامیکی خاک مشخص و قطعی نیستند. روش‌های پیشنهادی بازار و کرنل [۱۳] به طور کامل مبتنی بر احتمالات بوده و با دقت خوب رفتار غیرخطی خاک را با تحلیل خطر لرزه‌ای ترکیب نموده، به پیش‌بینی تشدید خاک منطقه می‌پردازد. با بکارگیری این روش‌ها امکان دستیابی به رابطه‌ای بین شتاب طیفی و شدت تجاوز سالیانه  $(MRP)$  [یا عکس دوره بازگشت  $(MRE)$ ] فراهم می‌شود. در این روش اثر رفتار غیرخطی لایه‌های خاک در شدت حرکت سطح زمین به صورت ضریبی به نام ضریب تشدید که تابع فرکانس است، اعمال شده است. ضریب تشدید مطابق رابطه (۱) قابل تعریف است:

$$AF(f) = \frac{S_a^s(f)}{S_a^r(f)} \quad (1)$$

که در آن  $S_a^s(f)$  و  $S_a^r(f)$  به ترتیب شتاب طیفی روی بستر سنگی و سطح زمین و  $AF(f)$  منحنی تشدید می‌باشند. بدست آوردن منحنی تشدید، تحلیل دینامیکی ساختگاه (به روش خطی معادل و یا غیرخطی)، را می‌طلبد. برای تحلیل دینامیکی، نیاز به عواملی مانند شتاب‌نگاشت جنبش‌های نیرومند زمین و مشخصه‌های دینامیکی خاک است. برای ساختگاه‌هایی با مشخصه‌های دینامیکی قطعی می‌توان منحنی تشدید را با استفاده از روش‌های متداول بدست آورده و سپس طیف ویژه ساختگاه را بدست آورد. بازار و کرنل، برای دستیابی به طیف پاسخ مناطقی که خواص دینامیکی مشخصی ندارند، به اعمال عدم قطعیت‌ها در عوامل ورودی

### ۶- روش مبتنی بر اصلاح رابطه کاهندگی<sup>۷</sup>

این روش، روشی مستقیم برای تخمین طیف خطر ویژه ساختگاه است که با مشخصات خاص آن منطقه به تولید رابطه کاهندگی می‌پردازد و در این مقاله با عبارت MGPE نشان داده شده است. از مزیت‌های این روش نیاز نبودن به تحلیل خطر روی بستر سنگی برای دستیابی به طیف ویژه ساختگاه روی سطح زمین است. ابتدا با استفاده از ضرایب ارائه شده توسط بازارو و کرنل (جدول (۱))، رابطه کاهندگی منتخب برای تحلیل خطر بستر سنگی  $S_a^r(f)$  مطابق روابط (۲) و

(۳) اصلاح می‌شود. سپس با استفاده از روابط اصلاح شده تحلیل خطر لرزه‌ای انجام می‌گیرد. بدین ترتیب، به راحتی می‌توان مقدار نامعلوم شتاب طیفی سطح زمین  $S_a^s(f)$  را بدست آورد.

$$S_a^r(f) \quad (۲)$$

$$\ln S_a^s(f) \approx c_1 + (c_2 + 1) \ln S_a^r(f) \quad (۳)$$

$$\varepsilon_{\ln S_a^s(f)} \approx \sqrt{(c_2 + 1)^2 \sigma^2_{\ln S_a^r(f)} + \sigma^2_{\ln AF(f)}}$$

اگر مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک معلوم باشند، می‌توان با تحلیل دینامیکی و تحلیل رگرسیون، ضرایب خاص منطقه را بدست آورد. در این صورت، با ترکیب رابطه کاهندگی بستر سنگی، شرایط محلی  $S_a^s(f)$  و مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک، یک رابطه کاهندگی تقریبی برای شتاب طیفی سطح زمین  $S_a^s(f)$  بدست می‌آید. به عبارت ساده‌تر، رابطه کاهندگی بستر سنگی با اعمال ضرایب ثابت رگرسیون  $c_1$  و  $c_2$  که تابعی از وضعیت خاک منطقه و فرکانس خاص می‌باشد، اصلاح و رابطه کاهندگی جدید با توجه به شرایط غیرخطی خاک بدست می‌آید. بازارو و کرنل با در نظر گرفتن مشخصات غیرقطعی خاک و اعمال عدم قطعیت‌ها در مراحل مختلف، ضرایب جدول (۱) را ارائه نموده و استفاده از آن‌ها را برای مناطق مختلف با دقت  $\pm 10\%$  قابل قبول می‌دانند. بدین ترتیب لزومی به انجام تحلیل دینامیکی نبوده و می‌توان به سادگی و با استفاده از  $c_1$  و  $c_2$  برای دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای به اصلاح رابطه پرداخت

جدول (۱): ضرایب ثابت رگرسیون ارائه شده توسط کرنل و بازارو [۲۲]

خاک‌های ماسه‌ای		خاک‌های رسی		$f(Hz)$
$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	
-۰,۰۲	۰,۴۵	-۰,۰۲	۰,۶۷	۰,۳۳
-۰,۱۷	۰,۶۶	-۰,۲۸	۰,۷۱	۰,۷۵
-۰,۳۲	۰,۲۵	-۰,۲۳	۰,۵۴	۱
-۰,۴۸	-۰,۲۱	-۰,۴۷	۰,۲۷	۲
-۰,۵۷	-۰,۵۲	-۰,۴۹	-۰,۰۸	۵
-۰,۴۹	-۰,۸۵	-۰,۵۷	-۰,۶۸	۱۰۰

### ۷- روش کانولوشن

روش دومی که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است روش کانولوشن است که یکی از دقیق‌ترین روش‌های موجود برای اعمال مستقیم اثرات رفتار غیرخطی خاک در پاسخ ویژه ساختگاه به شمار می‌رود [۱۳]. در این روش، خطر لرزه‌ای در سطح زمین، با ترکیب طیف خطر در تراز بستر سنگی و توزیع احتمالاتی منحنی تشدید بدست می‌آید. به عبارت بهتر، برای محاسبه شتاب طیفی سطح زمین  $(Z=S_a^s(f))$ ، شتاب طیفی بستر سنگی  $(Y=AF(f))$ ، با توزیع احتمالاتی منحنی تشدید، ترکیب می‌شود.

در این مقاله روش کانولوشن به اختصار به صورت CM نشان داده خواهد شد. این روش در دو حالت دقیق (ECM) و تقریبی (ACM) براساس مبانی احتمالاتی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۷-۱- روش دقیق

در این حالت، منحنی تشدید مستقل از بزرگا و فاصله از منبع لرزه‌زا (M و R) در نظر گرفته شده و روابط (۴) و (۵) برای تخمین خطر منطقه ارائه شده‌اند. در این رابطه  $P[X=x_j]=P_X(x_j)$  برابر است با احتمال اینکه ورودی بستر سنگی برابر  $x_j$  باشد. به طور عموم  $P_X(x)$  تابع چگالی احتمال شتاب طیفی بستر سنگی می‌باشد.  $G_{Y|X}M, R, X$ ، CCDF،  $G_{Y/M,R,X}$  تابع تشدید (لگاریتمی نرمال) مربوط به ورودی بستر سنگی  $x_j$  می‌باشد:

$$G_Z(z) = \sum_{all x_j} G_{Y|X} \left( \frac{z}{x} \middle| X = x_j \right) P[X = x_j] \quad (۴)$$

$$G_{Y|X} \left( \frac{z}{x} \middle| x_j \right) = \hat{\phi} \left( \frac{\ln \left[ \frac{z}{x} \right] - \ln \left[ m_Y(x) \right]}{\sigma_{\ln Y|X}} \right) \quad (۵)$$

## ۷-۲- روش تقریبی

براساس رابطه (۶)، این روش، حالت ساده شده روش کانولوشن است که در آن تابع تشدید  $Y$ ، به طور کامل مستقل از شتاب طیفی بستر سنگی،  $X$  فرض می‌شود:

$$G_z(z) = G_X \left( \frac{z}{m_y} \right) e^{\frac{1}{2} k_1^2 \sigma_{\ln Y}^2} \quad (۶)$$

در این رابطه،  $k_1$  شیب  $G_X$  در مجاورت  $\hat{m}_y x = \frac{z}{m_y}$  در محیط لگاریتمی و  $\hat{m}_y$  مقدار میانگین منحنی تشدید می‌باشند:

$$\hat{m}_y = \hat{m}_{AF(f)} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \ln AF(f)}{n} \right] \quad (۷)$$

در رابطه فوق،  $n$  تعداد رکورد و  $\sigma_{\ln Y}^2$  واریانس لگاریتمی طبیعی  $Y=AF(f)$  می‌باشند:

$$\sigma_{\ln Y} = \sigma_{\ln AF(f)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln AF(f) - \hat{m}_{AF(f)})^2}{n-1}} \quad (۸)$$

رابطه (۶) فقط در صورتی می‌توان استفاده نمود که مشخصات قطعی پروفیل خاک ساختگاه مورد نظر و در نتیجه آن، منحنی تشدید میانگین معلوم باشد. بازار و کرنل برای حالتی که مشخصات قطعی پروفیل خاک در دسترس نباشد، از ترکیب روابط (۲) و (۶) رابطه‌ای جدید به صورت رابطه (۹) بدست آورده‌اند، که می‌توان با استفاده از آن، فقط با در دست داشتن منحنی خطر بستر سنگی در هر فرکانس خاص، پاسخ ویژه ساختگاه مورد نظر در همان فرکانس را بدست آورد. در این رابطه  $H(S_{a,z}^r)$  مقدار متناظر نقطه  $S_{a,z}^r = \left( \frac{z}{c_0} \right)^{\frac{1}{c_1+1}}$  در منحنی خطر مربوط به بستر سنگی است:

$$G_Z(z) = H(S_{a,z}^r) e^{\frac{k^2 \sigma^2}{2(c_1+1)^2}} \quad (۹)$$

## ۸- مطالعات موردی انجام شده

پتانسیل لرزه‌خیزی بالا و شرایط تکتونیکی حاکم در ایران، توجه بیش از پیش به اثر رفتار دینامیکی لایه‌های خاک بر پاسخ ساختگاه را می‌طلبد. با توجه به اهمیت این موضوع و

عدم توجه کافی به آن در ایران، در این مقاله برای اولین بار به مطالعه و بررسی اثرات رفتار غیرخطی خاک در تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای در دو شهر لرزه‌خیز ایران (تبریز و تهران)، پرداخته شده است.

مطالعات انجام شده در این مقاله را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای روی بستر سنگی ساختگاه‌های منتخب
۲. تحلیل دینامیکی خاک و بدست آوردن منحنی تشدید در ساختگاه‌های منتخب
۳. تهیه طیف ویژه ساختگاه به روش ACM
۴. تهیه طیف ویژه ساختگاه به روش MGPE
۵. تهیه برنامه‌ای در محیط اکسل برای دستیابی به طیف ویژه ساختگاه به روش ECM، با استفاده از منحنی تشدید خاص منطقه
۶. مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف برای بررسی دقت حاصل از تولید منحنی‌های تشدید تصادفی

## ۸-۱- مناطق مورد مطالعه

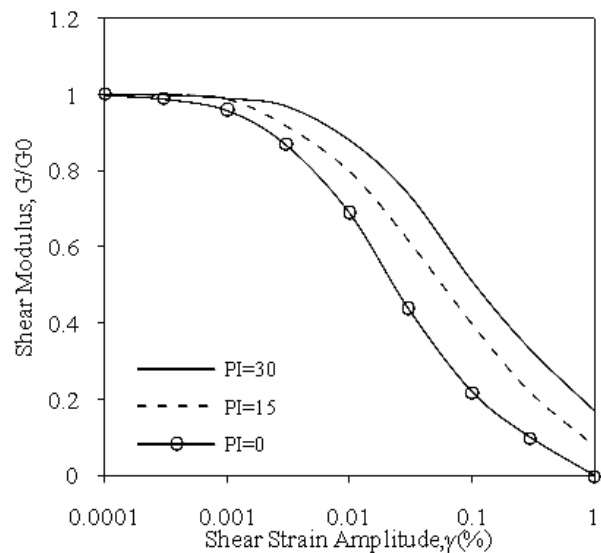
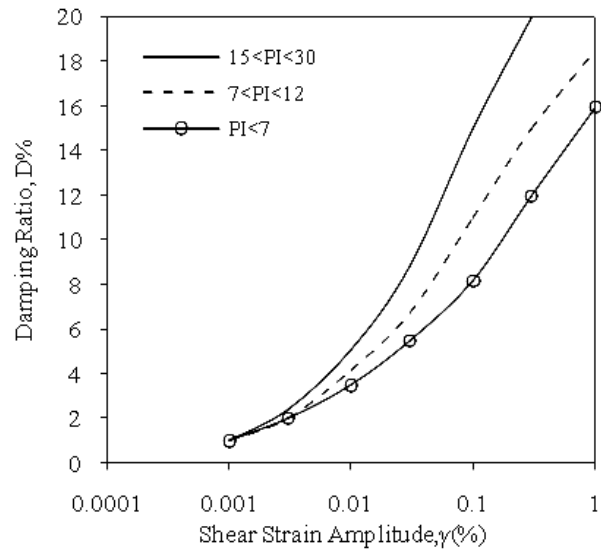
تحلیل‌های مورد نظر برای تهیه طیف ویژه ساختگاه برای دو شهر تهران و تبریز به ترتیب در چهار و شش ایستگاه مختلف انجام و به عنوان نمونه نتایج مربوط به دو ایستگاه با نوع خاک رسی و ماسه‌ای در این مقاله ارائه شده است. در روش‌های مورد بحث در این مقاله، علاوه بر تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای، اطلاعاتی مانند نحوه لایه‌بندی خاک، مشخصات ژئوتکنیکی و دینامیکی لایه‌های خاک و محل سنگ بستر مورد نیاز است. برای دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در تهران، از منابع موجود در پژوهشگاه بین-المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه-ای تهران استفاده شده است [۲۳]. داده‌های مورد نیاز برای تبریز نیز از مطالعات انجام شده توسط کمیته فرعی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه‌های زمین، تهیه شده است [۲۴].

به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در مورد مشخصات دینامیکی مؤثر در رفتار دینامیکی خاک (منحنی ضریب میرایی و منحنی مدول برشی) برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی در شهر تبریز و ماسه-ای در تهران از نمودارهای ارائه شده توسط سید و ادريس استفاده شده است [۲۵]. لیکن برای خاک رسی در شهر تهران، مطالعات گسترده‌تری انجام شده [۲۶] و منحنی‌های مربوط به ضریب میرایی و مدول برشی برای شاخص پلاستیک‌های مختلف در شکل (۱) ارائه شده است که در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۲): گسل‌های فعال تهران

شماره	نام گسل	طول (کیلومتر)
۱	Alamutrud	۱۱۵
۲	North Alborz	۴۶۶
۳	North Khazar	۶۱
۴	Kandevan	۷۶
۵	Taleqan	۵۳
۶	North Tehran	۷۵
۷	Kahrizak	۳۹
۸	Pishva	۳۰
۹	Siahkuh	۱۳۳
۱۰	Kushke Nosrat	۲۰۰
۱۱	Mosha	۲۰۰
۱۲	Karaj	۲۸,۵
۱۳	Eshtehard	۵۷
۱۴	Ipak	۶۶
۱۵	North Ray	۱۹
۱۶	South Ray	۲۲
۱۷	Qasre Firuze	۱۱,۵
۱۸	Eyvanaki	۱۶,۸
۱۹	Parchin	۱۷

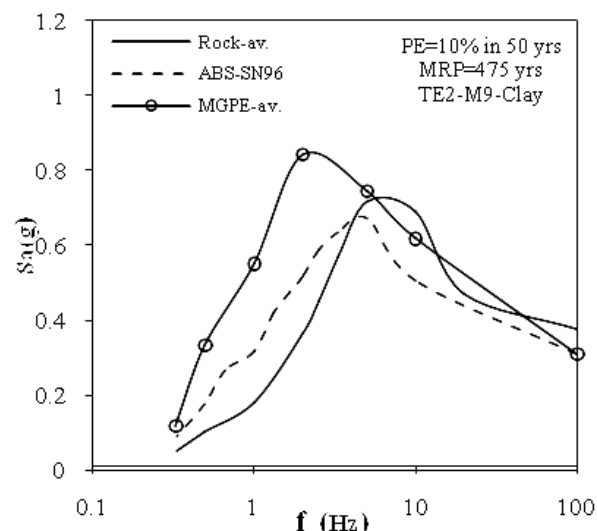
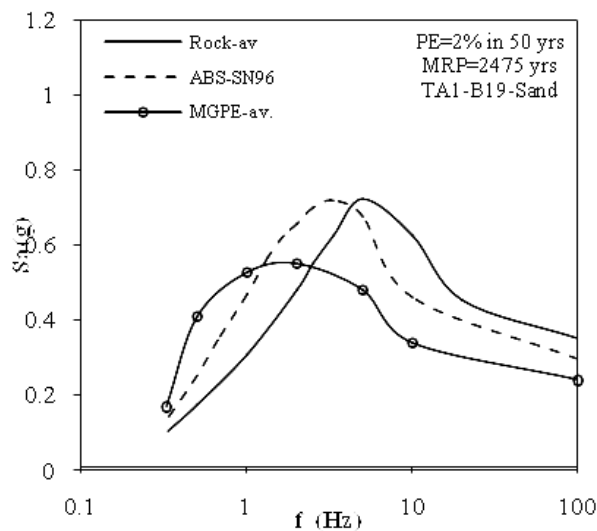
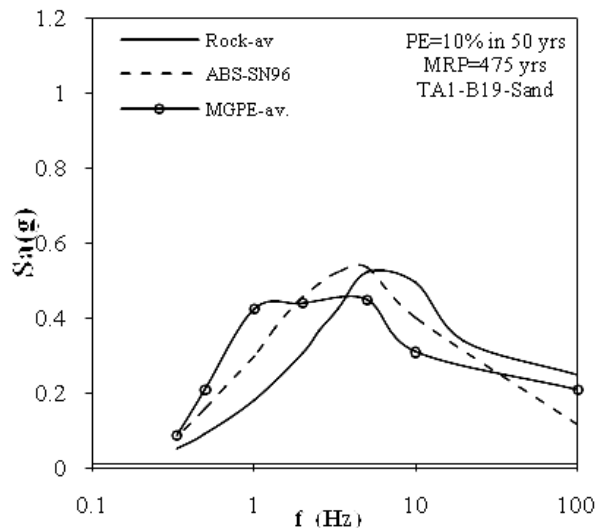
مرحله بعد، جمع‌آوری کاتالوگ‌های زلزله در دو دسته تاریخی (پیش از سده بیستم) و دستگامی (۱۹۰۰ تا ۲۰۰۹ میلادی) است. کاتالوگ‌های گردآوری شده باید عاری از پیش‌لرزه و پس‌لرزه باشند. بدین منظور از روش ارائه شده توسط نوپوف برای حذف حوادث غیرمستقل استفاده شده است [۲۷]. سپس، عوامل لرزه-خیزی با استفاده از برنامه‌ی "کیکو" محاسبه و در جدول (۳) خلاصه شده است [۲۸]. گام بعدی ارزیابی خطر لرزه‌ای، اعمال شرایط کاهندگی است که به کمک برنامه‌ی "سیزریسک" انجام می‌گیرد [۳۰]. گفتنی است یکی از مهم‌ترین و اثرگذارترین مرحله تحلیل خطر، انتخاب رابطه کاهندگی مناسب است که در این مرحله از کار صورت می‌گیرد. در این مقاله، از روابط کاهندگی آبراهامسون و سیلوا [۱۰]، کمپل و بزرگ‌نیا [۱۸] و قاسمی و همکاران [۳۱] برای دستیابی به طیف خطر بستر سنگی ( $S_d$ ) استفاده شده است. سپس برای کاهش عدم قطعیت‌های موجود، نتایج حاصل براساس روش درخت منطقی<sup>۱۲</sup> و با وزن‌های مساوی با هم ترکیب شده و در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطمینان از درستی انجام تحلیل خطر انجام شده، نتایج این تحقیق با عوامل لرزه‌خیزی ارائه شده توسط توکلی و آشتیانی



شکل (۱): تغییرات ضریب میرایی و مدول برشی در برابر کرنش برای خاک‌های رسی با شاخص پلاستیسیته‌های مختلف [۲۶]

## ۲-۸- تحلیل خطر احتمالاتی لرزه‌ای روی بستر سنگی

نخستین مرحله در تحلیل خطر احتمالاتی، شناسایی و مشخص نمودن منابع لرزه‌ای است. در دو شهر تبریز و تهران در منطقه‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر تمامی منابع لرزه‌ای با استفاده از نقشه گسل‌های فعال ایران (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ۱۳۸۲) استخراج شده است. از گسل‌های مهم تبریز می‌توان به گسل شمال تبریز و میشو اشاره نمود. گسل‌های فعال مورد استفاده در تحلیل‌ها برای شهر تهران در جدول (۲) آورده شده‌اند.



شکل (۲): طیف ویژه مربوط به ساختگاه‌های TE2-M9-Clay و TA1-B19-Sand به دو روش ABS-SN97 و MGPE برای دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

[۲۹] در جدول (۳) مقایسه شده است. در این مقایسه از سه عامل  $\beta$ ،  $M_{max}$  که به ترتیب ضریب گوتنبرگ-ریشتر، نرخ فعالیت و بیشینه بزرگی مورد انتظار می‌باشند استفاده شده است.

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصل با عوامل لرزه‌خیزی ارائه شده توسط نوکلی و آشتیانی [۲۹]

عوامل لرزه‌خیزی تهران		
عوامل	این مقاله	مرجع [۲۹]
$B$	$1,32 \pm 0,07$	$1,41 \pm 0,11$
$M_{max}$	$7,8 \pm 0,2$	$7,9 \pm 0,3$
$\lambda_{4,5}$	$0,31$	$0,37$

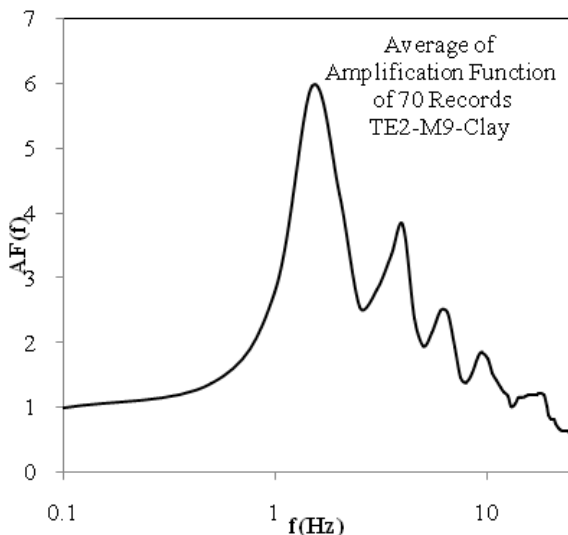
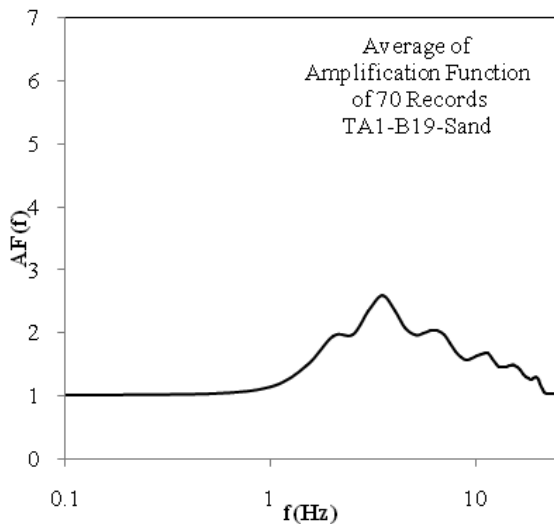
عوامل لرزه‌خیزی تبریز		
عوامل	این مقاله	مرجع [۲۹]
$\beta$	$1,83 \pm 0,09$	$1,68 \pm 0,17$
$M_{max}$	$7,8 \pm 0,14$	$7,6 \pm 0,4$
$\lambda_{4,5}$	$0,26$	$0,14$

### ۳-۸- اعمال اثرات رفتار غیرخطی خاک در تحلیل خطر مناطق مورد مطالعه

برای ساختگاه‌های مورد مطالعه ابتدا تحلیل خطر با استفاده از رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (ABS-SN97) با فرض خاک عمومی با رفتار غیرخطی، انجام شده است. نتایج حاصل برای دو ساختگاه مورد مطالعه در شهر تهران و تبریز (TA1-B19-Sand و TE2-M9-Clay) به ترتیب با طول و عرض جغرافیایی (۳۵,۶۱ ۵۱,۴۱) و (۳۸,۰۵ ۴۶,۲۵) به همراه نتایج حاصل از روش اصلاح روابط کاهندگی (MGPE) در شکل (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است این منحنی‌ها برای دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال تهیه شده است.

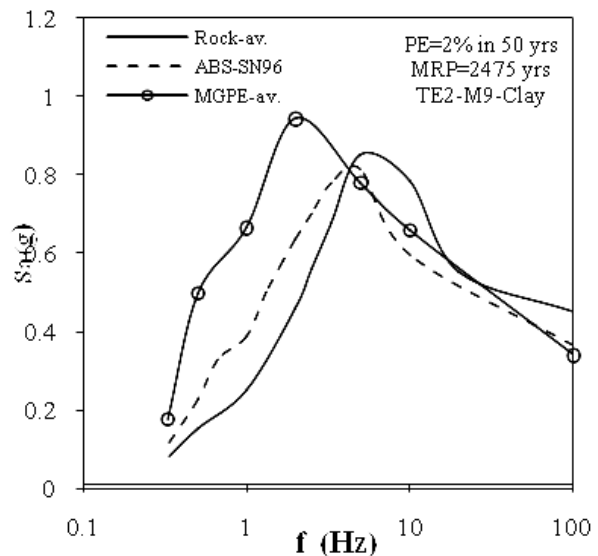


برای ساختگاه موردنظر است. برای اطمینان از صحت نتایج حاصل، منحنی خطر ارائه شده توسط بازارو و کرنل برای ساختگاه ماسه‌ای در فرکانس یک هرتز مورد تحقیق قرار گرفت. با در دست داشتن منحنی خطر بستر سنگی و منحنی تشدید ساختگاه ماسه‌ای مورد مطالعه، منحنی‌های خطر سطح زمین با دو روش ACM و ECM تهیه شده است. پس از اطمینان از صحت نتایج حاصل از این برنامه، روش‌های مورد نظر برای تمامی ساختگاه‌های مورد مطالعه به اجرا رسید.



شکل (۳): منحنی تشدید برای دو ساختگاه TE2-M9-Clay و TA1-B19-Sand

طیف ویژه دو نمونه از ساختگاه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. تفاوت اساسی بین نتایج دو روش ACM و ECM در سطوح خطرپذیری ۱۰ درصد و ۲ درصد در ۵۰ سال (دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال) قابل مشاهده نیست و هر دو روش



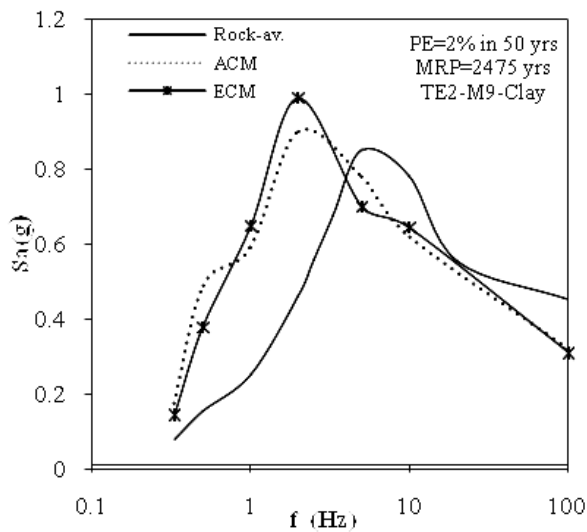
ادامه شکل (۲): طیف ویژه مربوط به ساختگاه‌های TE2-M9-Clay و Clay  
برای دو روش ABS-SN97 و MGPE  
دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

برای دستیابی به طیف ویژه ساختگاه، به روش اصلاح رابطه کاهندگی، ابتدا با استفاده از ضرایب ثابت ارائه شده  $C_1$  و  $C_2$ ، روابط کاهندگی مورد استفاده در تحلیل خطر بستر سنگی اصلاح شده و تحلیل خطر متداول با بکارگیری این روابط انجام می‌گیرد. چنانچه واضح و مشخص است، اختلاف قابل-توجهی در حدود بیست تا چهل درصد بین نتایج حاصل از این دو روش به خصوص در فرکانس‌های پایین وجود دارد.

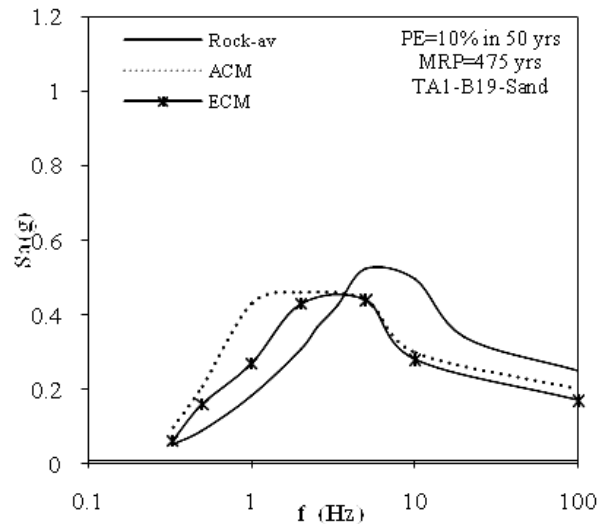
مرحله اول در روش ECM دستیابی به منحنی تشدید ساختگاه است. در این راستا، ابتدا طیف گسترده‌ای از رکوردهای زلزله‌های ثبت شده روی بستر سنگی (۷۰ رکورد با بزرگای بین ۵ تا ۷٫۴ ریشتر و فاصله بین ۰٫۱ تا ۱۵۷ کیلومتر) انتخاب شده و سپس با استفاده از برنامه خطی معادل شیک و اعمال هر یک از این رکوردها به پروفیل‌های دینامیکی مورد نظر منحنی تشدید بدست می‌آید. به عبارت ساده‌تر، برای هر ساختگاه، به تعداد رکوردها تحلیل دینامیکی انجام داده و میانگین منحنی‌های حاصل، به عنوان منحنی تشدید ساختگاه، وارد محاسبات خواهد شد. دو نمونه از منحنی‌های تشدید بدست آمده در شکل (۳) ارائه شده است.

برای تسهیل در روند محاسبات، برنامه‌ای در محیط اکسل تهیه شده، که با استفاده از آن منحنی خطر ویژه ساختگاه را می‌توان بدست آورد. ورودی‌های این برنامه شامل منحنی خطر بستر سنگی و منحنی تشدید در فرکانس‌های مختلف

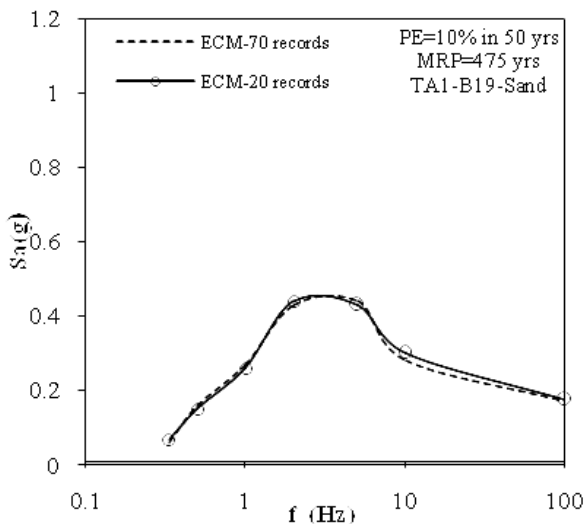
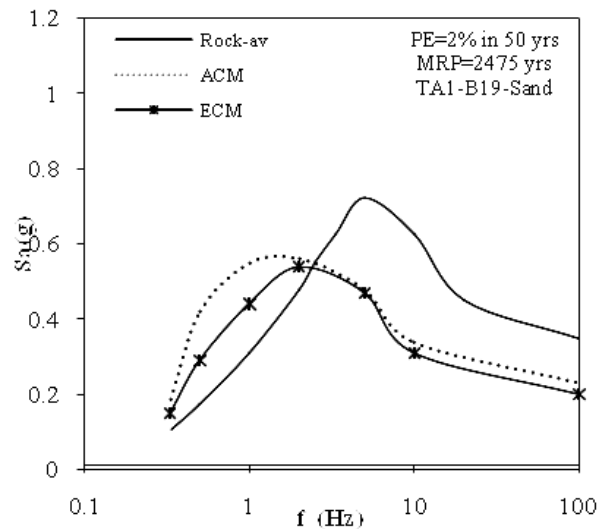
در سطوح لرزه خیزی بالا نیز قابل استفاده می باشند.



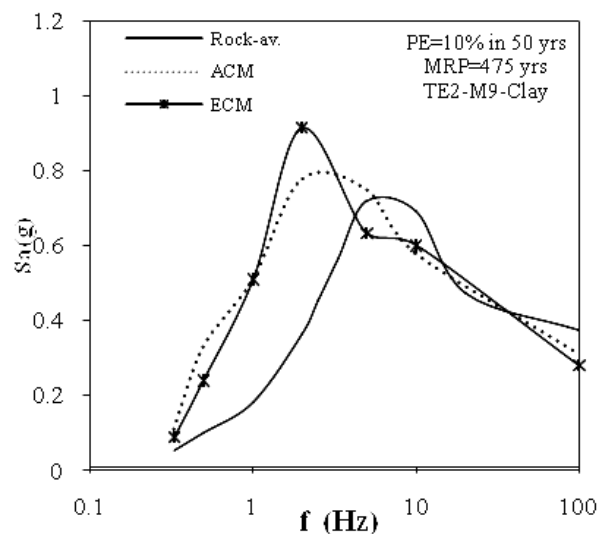
شکل (۴): طیف ویژه ساختگاه برای دو ایستگاه TE2-M9-Clay و TA1-B19-Sand حاصل از روش ACM و ECM



بازارو و کرنل روابطی را برای تخمین تعداد رکوردهای مورد استفاده در تحلیل دینامیکی ارائه نموده اند که بیانگر رابطه معکوس بین خطای موجود در نتایج و تعداد رکوردها است. در این بخش از مقاله، این مهم نیز بررسی شده است. در برخی از ساختگاهها، ابتدا منحنی تشدید با اعمال ۲۰ رکورد و سپس ۷۰ رکورد بدست آمد. در شکل (۵) طیف حاصل از روش ECM در دو حالت برای دو ساختگاه گفته شده نشان داده شده است. مقایسه منحنیها در دو حالت نشانگر تفاوتی در حدود یک تا شش درصد است.



شکل (۵): مقایسه طیف ویژه برای دو ساختگاه TE2-M9-Clay و TA1-B19-Sand براساس منحنیهای تشدید حاصل از ۲۰ و ۷۰ رکورد



## ۹- نتیجه گیری

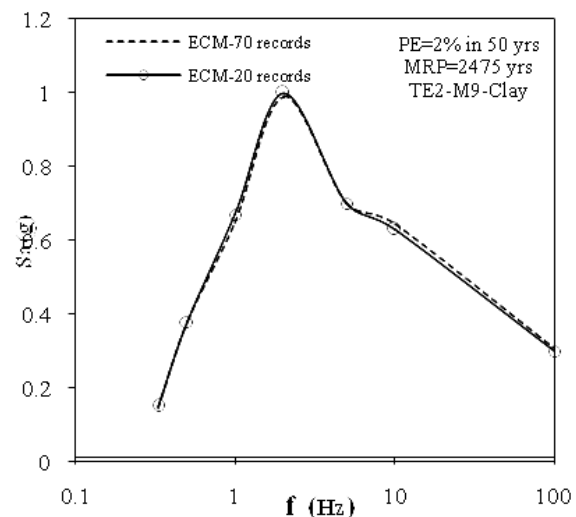
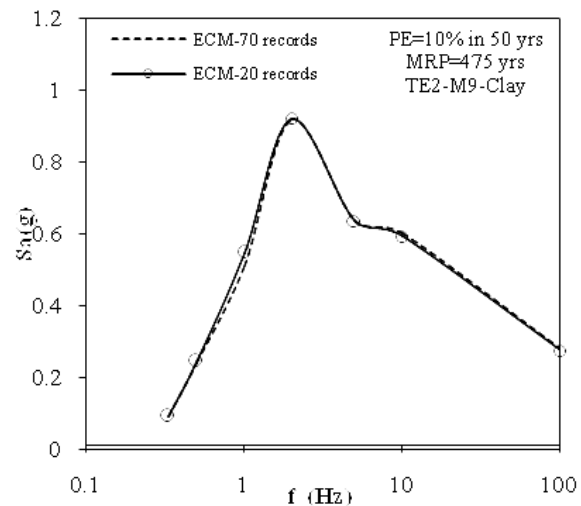
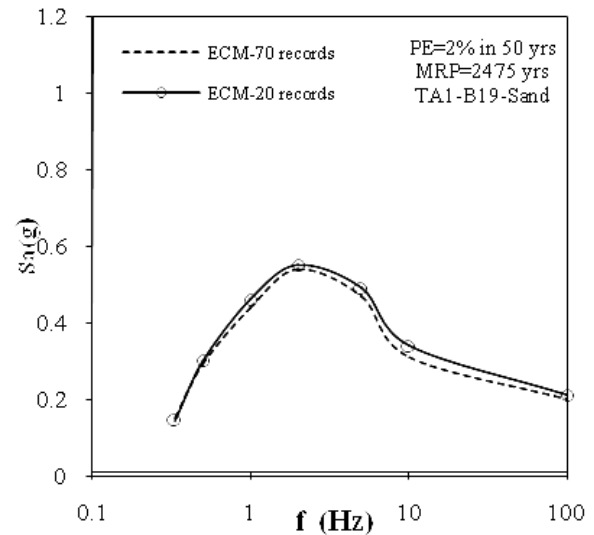
لایه‌های خاک، طی حرکات نیرومند زمین، به طور عموم وارد محدوده رفتار غیرخطی می‌شود. از این رو، اعمال اثرات رفتار غیرخطی خاک در تحلیل پاسخ زمین اهمیت ویژه‌ای بخود می‌گیرد. یکی از مراحل اثرگذار در تحلیل خطر احتمالاتی انتخاب رابطه کاهندگی مناسب است. لیکن، در روابط کاهندگی متداول فقط رفتار خطی خاک در نظر گرفته شده است. در این مقاله روش‌های مختلف اعمال اثرات غیرخطی خاک بر طیف ویژه ساختگاه برای ایستگاه‌های انتخابی در شهرهای تبریز و تهران مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل برای دو نمونه از ایستگاه‌های ماسه‌ای و رسی ارائه شده است.

روش‌های بررسی شده را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- ۱- تحلیل خطر احتمالاتی براساس رابطه کاهندگی آبراهامسون و سیلوا، که با افزودن عاملی به رابطه کلی به اعمال اثرات رفتار غیرخطی خاک پرداخته است (ABS-SN97).
- ۲- تحلیل خطر احتمالاتی با استفاده از رابطه کاهندگی اصلاح شده براساس ضرایب ارائه شده توسط بازارو و کرنل (MGPE).
- ۳- روش ساده شده کانوولوشن (ACM).
- ۴- حالت دقیق روش کانوولوشن براساس منحنی تشدید مختص ساختگاه (ECM).

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این مقاله را می‌توان، به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- روش ABS-SN97 تخمین ضعیفی از شتاب روی سطح زمین بخصوص در فرکانس‌های پایین دارد.
- در صورتیکه مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک مشخص و قطعی باشند، روش ECM به عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش برای محاسبه طیف ویژه ساختگاه توصیه می‌شود.
- یکی از مراحل روش ECM بدست آوردن منحنی تشدید با تحلیل دینامیکی لایه‌های خاک است. بررسی اثر تعداد رکوردها روی طیف ویژه ساختگاه در دو مرحله، با استفاده از ۲۰ و ۷۰ رکورد، اختلافی در حدود یک تا ده درصد را نشان داد.
- در صورتیکه مشخصات دینامیکی لایه‌های خاک مشخص و قطعی نباشند، یکی از دو روش MGPE و ACM را می‌توان بکار برد که تقریباً نتایج مشابهی را به دنبال دارند. در اکثر موارد اصلاح رابطه کاهندگی نتیجه محافظه‌کارانه‌تری به دنبال دارد.



ادامه شکل (۵): مقایسه طیف ویژه برای دو ساختگاه TE2-M9 و Clay و TA1-B19-Sand براساس منحنی‌های تشدید حاصل از ۲۰ و ۷۰ رکورد

## ۱۰- مراجع

- Illinois at Urbana, 2003.
- Bazzurro, P. and Cornell C. A. ,“Nonlinear Soil- [۱۳]  
Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard  
Analysis”, Seismosignal Society of America,  
96(6), pp. 2110–2123, 2004.
- Park D. and Hashash Y. M.A. ,“Evaluation of [۱۴]  
seismic site factors in the Mississippi Embayment.  
II. Probabilistic seismic hazard analysis with  
nonlinear site effects”, Soil Dynamics and  
Earthquake Engineering 25(2), pp. 145-156, 2005.
- Hardin, B. O. and Drnevich V. P. ,“Shear Modulus [۱۵]  
and Damping in Soils: Design Equations and  
Curves”, Soil Mechanics and Foundation,  
98(SM7), pp. 289-234, 1972.
- Yuxian, H. and Chen H. Y. ,“Probabilistic [۱۶]  
Analysis of Uncertainties in Seismic Hazard  
Assessment”, Structural Safety, 11, pp. 245-253,  
1992.
- Cornell, C. A. ,“Engineering Seismic Risk [۱۷]  
Analysis”, Seismosignal Society of America,  
58(5),1968.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia Y. ,“Updated [۱۸]  
Near-Source Ground-Motion (Attenuation)  
Relations for the Horizontal and Vertical  
Components of Peak Ground Acceleration and  
Acceleration Response Spectra”, Seismosignal  
Society of America, 93(1), pp. 314–331, 2003.
- Boore, D. M. Joyner W. B. and Fumal T. E., [۱۹]  
“Equation for Estimating Horizontal Response  
Spectra and Peak Acceleration from Western  
North American Earthquake”, Seismological  
Research Letters, 68(1), pp. 128–153, 1997.
- Li, X. S. Wang Z. L. and Shen C. K., “SUMDES: [۲۰]  
A Nonlinear Procedure for Response Analysis of  
Horizontally-Layered Sites Subjected to Multi-  
Directional Earthquake Loading”, Departement of  
Civil Engineering, University of California, Davis  
1992.
- Schnabel, P. B., Lysmer J. and Seed H. B., [۲۱]  
“SHAKE: A Computer Program for Earthquake  
Response Analysis of Horizontally Layered Sites”,  
Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake  
Engineering Research Center, University of  
California, Berkeley, December, pp. 102, 1972.
- Bazzurro, P. and Cornell C. A. ,“Ground-Motion [۲۲]  
Amplification in Nonlinear Soil Sites with  
Uncertain Properties”, Seismosignal Society of  
America, 94(6), pp. 2090–2109, 2004.
- Jafari, M. K. and Razmkhah A., “Complementary [۲۳]  
Seismic Geotechnical Microzonation of South of  
Tehran”, IIEES Report, International Institute of  
Earthquake Engineering and Seismology, Tehran,  
Iran (In Persian), 2001.
- Haeri, S. M. and Hajalilue Bonab M. ,“Seismic [۲۴]  
Microzonation and Design Spectrum for  
Metropolitan Area-Tabriz City”, National Disaster
- Kramer, S. L. ,“Geotechnical Earthquake [۱]  
Engineering”, Prentice-Hall International Series in  
Civil Engineering and Engineering Mechanics,  
Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458,  
1996.
- Iranian Code of Practice for Seismic Resistant [۲]  
Design of Buildings, Standard No.2800, 3rd  
edition, Building and Housing Research Center  
(BHRC), 2005.
- Trifunace, M. D. and Todorovska M. I., [۳]  
“Nonlinear Soil Response-1994 Northridge,  
California, Earthquake”, journal of Geotechnical  
Engineering, 122(9), pp. 725-735, 1996.
- Cultrera, G., Boor D. M., Joyner W. B. and Dietel [۴]  
Ch. M. ,“Nonlinear Soil Response in the Vicinity  
of the Van Normal Complex Following the 1994  
Northridge, California, Earthquake”, Seismosignal  
Society of America, 89(5), pp. 1214-1231, 1999.
- Pavlenko, O. V. and Irikura K. ,“Nonlinearity in [۵]  
the Response of Soils in the 1995 Kobe  
Earthquake in Vertical Components of Records”,  
Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22,  
pp. 967-975, 2002.
- Roumelioti, Z. and Beresnev I. A. ,“Stochastic [۶]  
Finite-Fault Modeling of Ground Motions from  
the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake:  
Application to Rock and Soil Sites With  
Implications for Nonlinear Site Response”  
,Seismosignal Society of America, 93(4), pp.  
1691-1702, 2003.
- Pavlenko, O. V. and Wen K. L. ,“Estimation of [۷]  
Nonlinear Soil Behavior During the 1999 Chi-Chi,  
Taiwan, Earthquake”, Pure and Applied  
Geophysics, 165, pp. 373-407, 2008.
- Seed, H. B., Murarka R., Lysmer J. and Idriss I. [۸]  
M. ,“Relationships Between Maximum  
Acceleration, Maximum Velocity, Distance from  
Source and Local Site Conditions for Moderately  
Strong Earthquake”, Seismosignal Society of  
America, 66(4), pp. 1323-1342, 1976.
- Idriss, I. M. ,“Response of Soft Soil Sites During [۹]  
Earthquakes”, Proceedings of the Symposium to  
Honor H.B. Seed, Berkeley, CA, pp. 273-289,  
1990.
- Abrahamson, N. A. and Silva W. J. ,“Empirical [۱۰]  
Response Spectra Attenuation Relations for  
Shallow Crustal Earthquakes”, Seismological  
Research Letters, 68, pp. 94–127, 1997.
- Silva, W. J., Lee R., McGuire R. K. and Cornell [۱۱]  
C. A. ,“A comparison of Methodologies to  
Achieve a Site-Specific PSHA (abstract)”,  
Seismological Research Letters, 71, pp. 247, 2000.
- Park, D. ,“Estimation of Non-Linear Seismic Site [۱۲]  
Effects for Deep Deposits of the Mississippi  
Embayment”, Ph.D. Dissertation, University of

82(1), pp. 120-134, 1992.

Tavakoli, B. and Ghafory-Ashtiany M., "Seismic Hazard Assessment of Iran Annali Di Geo\_sica 42", The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, pp. 1013-1021, 1999. [۲۹]

Bender, B. and Perkins D. M. , "SEISRISKIII: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation", U.S. Geological Survey, 1772, 1987. [۳۰]

Ghasemi, H., Zare M., Fukushima Y. and Koketsu K. , "An Emprical Spectral Ground Motion Model for Iran", Journal of Seismology 13, pp. 499-515, 2009. [۳۱]

Task Force, Earthquake and Land Slide hazard Committee , In Persian, 2005.

Seed, H. B. and Idriss I. M. , "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", College of Engineering University of California Berkeley, Berkeley, 1970. [۲۵]

Jafari, M. K. Shafiee A. and Razmkhah A., "Dynamic Properties of Fine Grained Soil in South of Tehran", Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4(1), pp. 25-35, 2002. [۲۶]

Gardner, J. K. and Knopoff L. , "Is the Sequence of Earthquake in Southern California, With Aftershocks Removed, Poisoning?", Seismosignal Society of America, 64(5), pp. 1363-1367, 1974. [۲۷]

Kijko, A. and Sellevoll M. A. , "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data \_Les. Part II, Incorporation of Magnitude Heterogeneity", Seismosignal Society of America, [۲۸]

## ۱۱- زیر نویس ها

<sup>۱</sup> Kijko

<sup>۲</sup> SEISRISK

<sup>۳</sup> Logic Tree

<sup>۴</sup> PSHA-NL

<sup>۵</sup> Convolution Method

<sup>۶</sup> SUMDES

<sup>۷</sup> SHAKE

<sup>۸</sup> Base Case

<sup>۹</sup> Randomized Case

<sup>۱۰</sup> Modified Ground-motion Prediction Equation

<sup>۱۱</sup> Exact Convolution Method

<sup>۱۲</sup> Approximate Convolution Method