

بررسی و مقایسه نرم افزاری نتایج آنالیز پاسخ ساختگاه

حسن اسماعیل‌زاده

دانشجوی دکترای عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران
Esmailzadeh_hassan@yahoo.com

مسعود میرمحمد صادقی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده مهندسی عمران، اصفهان، ایران
Msadeghi84@yahoo.com

کلید واژه‌ها: آنالیز خطی پاسخ ساختگاه، شتاب نگاشت، فوریه، طیف پاسخ

چکیده

بررسی آنالیز پاسخ زمین یکی از مهم‌ترین مسائل مطروحه در زمینه ژئوتکنیک لرزه ای می‌باشد. آنالیز پاسخ زمین جهت پیش بینی حرکت‌های سطح زمین و تعیین طیف پاسخ طرح به منظور تعیین تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی برای محاسبه نیروهای ناشی از زلزله در تحلیل پایداری زمین و سازه‌های حائل به کار می‌رود. امروزه با پیشرفت و گسترش تکنولوژی شاهد رشد کمی و کیفی در زمینه علم دینامیک خاک و زیرساخت‌های مرتبط با آن هستیم. به عنوان مثال تحلیل ساختگاه یک پروژه با استفاده از نرم افزارهای موجود و در دسترس سبب شده تا برآورد دقیق تری از نحوه عملکرد رفتار دینامیکی خاک‌ها در محل ساخت پروژه داشته باشیم. از جمله نرم افزارهایی که در این زمینه کارآیی قابل قبولی دارد، نرم افزارهایی با نام اختصاری EERA (Equivalent-Linear Earthquake site Response Analyses) و NERA (Non-Linear Earthquake site Response Analyses) می‌باشد. در واقع نرم افزار EERA برای آنالیز خطی معادل و نرم افزار NERA برای آنالیز غیرخطی مناسب است. در مقاله حاضر سعی شده با استفاده از نرم افزارهای مورد اشاره و نیز بر اساس مقاله مرجع به بررسی و مقایسه نتایج استخراج شده از قبیل پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی در سطح زمین، طیف پاسخ شتاب، حداکثر شتاب، تنش برشی و کرنش برشی نسبت به عمق بپردازیم.

مقدمه

به منظور تحلیل پاسخ زمین، ساختگاه را می‌توان به صورت‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در نظر گرفت. تحلیل‌های یک بعدی پاسخ زمین بر پایه این فرض استوار است که سطح زمین و مرز تمام لایه‌های زیر سطح زمین افقی بوده و در تمام جهات جانبی، نامحدود می‌باشند. با وجود این که روش‌های دو بعدی و سه بعدی توسعه یافته روش‌های یک بعدی هستند اما روش‌های تحلیل پاسخ زمین بر پایه ابعاد مسئله، طبقه بندی می‌شوند. در بخش بعدی به تشریح روش‌های تحلیل پاسخ زمین خواهیم پرداخت. مطالعه پراکندگی خسارت در زلزله‌های مختلف بیانگر اهمیت تاثیر ساختگاه بر مشخصات زمین لرزه است [۱]. از سال ۱۹۲۰ زلزله‌شناسان و اخیراً مهندسين ژئوتکنیک لرزه‌ای به منظور شبیه سازی این رفتار تشدید کننده خاک ساختگاهی روش‌های مختلفی ارائه داده اند [۲]. تحلیل پاسخ زمین جهت پیش بینی حرکات زمین و تهیه طیف پاسخ طرح به منظور تعیین تنش‌ها و کرنش‌های دینامیکی برای ارزیابی خطرات روانگرایی و محاسبه نیروهای ناشی از زلزله که می‌تواند سبب ناپایداری زمین و سازه‌های حائل گردد، به کار می‌رود. طی زلزله‌های گذشته عموماً مشاهده شده است که پاسخ زمین در خاک‌های نرم بسته به شرایط خاک محلی، بیشتر از پاسخ رخنمون سنگی بوده است [۱].

روش‌های تحلیل پاسخ زمین

امواج حجمی از منبع به تمام جهات زمانی منتشر می‌شود زمانی که یک گسل در زیر سطح زمین گسیخته شود. هنگامی که این امواج به مرز بین مصالح مختلف زمین شناسی می‌رسند، انعکاس یافته و شکسته می‌شوند. در حالی که سرعت انتشار امواج در مصالح کم عمق‌تر عموماً کمتر

از مصالح زیر آن‌ها می‌باشد. امواج مایل که با مرز لایه افقی برخورد می‌نمایند عموماً در جهت قائم‌تری منعکس می‌شوند. تحلیل یک بعدی پاسخ زمین بر پایه فرضیاتی چون افقی بودن مرز لایه‌ها و این که پاسخ یک توده خاک عمدتاً در اثر امواج SH که از بستر سنگی به صورت عمودی منتشر می‌شوند، استوار است. برای تحلیل یک بعدی پاسخ زمین فرض می‌شود که سطح خاک و بستر سنگی در جهت افقی تا بی‌نهایت ادامه دارند. پاسخ زمین ناشی از روش‌های مبتنی بر این فرضیه، تطابق منطقی با پاسخ اندازه‌گیری شده در حالت‌های مختلف دارد [۳].

روش خطی

در این روش با محاسبه تابع تبدیل خاک ساختمانه، پارامترهای مختلف پاسخ، هم‌چون جابجایی، سرعت، شتاب، تنش برشی و کرنش برشی براساس یکی از پارامترهای حرکت ورودی مثل شتاب بستر سنگی تعیین می‌شود. این روش بر پایه اصل قانون بقا استوار است.

روش خطی معادل

تعیین رفتار واقعی غیرخطی هیستریزس تنش-کرنش خاک‌های بارگذاری شده به صورت سیکیلی، با در نظر گرفتن خواص معادل خطی خاک توسط این روش انجام می‌پذیرد. مدل برشی معادل خطی (G) عموماً به صورت مدل برشی سکانت و ضریب میرایی معادل خطی (D) به صورت ضریب میرایی که اتلاف انرژی یکسانی با آن‌چه که منحنی هیستریزس متعلق به یک سیکل واقعی ایجاد می‌نماید در نظر گرفته می‌شود.

روش غیر خطی

این روش در واقع تحلیل پاسخ غیرخطی واقعی توده خاک با بهره‌گیری از انتگراسیون مستقیم عددی در حوزه زمان است. با انتگرال‌گیری از معادله حرکت در گام‌های کوتاه زمان، هر مدل تنش کرنش خطی یا غیرخطی یا مدل رفتاری پیچیده‌ای را می‌توان تحلیل کرد. در آغاز هر مرحله از زمان به رابطه تنش-کرنش رجوع می‌شود تا خصوصیات مناسب خاک که می‌بایست در آن گام زمانی به کار روند، تعیین گردد. با این روش یک رابطه تنش-کرنش غیرخطی غیر الاستیک را می‌توان در یک مجموعه گام‌های کوچک خطی به کار برد. متداول‌ترین مدل‌های تنش-کرنش سیکیلی به کار رفته در این گونه تحلیل‌ها مدل‌های هیپربولیک (Hyperbolic)، رامبرگ-اسگود (Ramberg-Osgood)، ایوان-امروز (Iwan-Mroz) و رامبرگ-اسگود اصلاح شده توسط هارا (Ramberg-Osgood model modified by Hara) می‌باشند.

روش خطی معادل وابسته به فرکانس

حرکت‌های زمین شامل تعدادی ویژگی طیفی بوده و نقش محتوای فرکانسی حرکت در تاریخچه زمانی کرنش به فرکانس حرکت بستگی خواهد داشت و از آنجایی که تحلیل پاسخ زمین شامل ویژگی‌های طیفی کرنش برشی نیز می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مدول برشی و نسبت میرایی مناسب تابع خصوصیات فرکانسی حرکت خواهند بود. برای لحاظ نمودن این ویژگی‌های فرکانسی، کرنش معادل وابسته به فرکانس به صورت ذیل بیان می‌شود [۴]:

$$\gamma_f(\omega) = C \gamma_{\max} \frac{F_f(\omega)}{F_{y\max}} \quad (1)$$

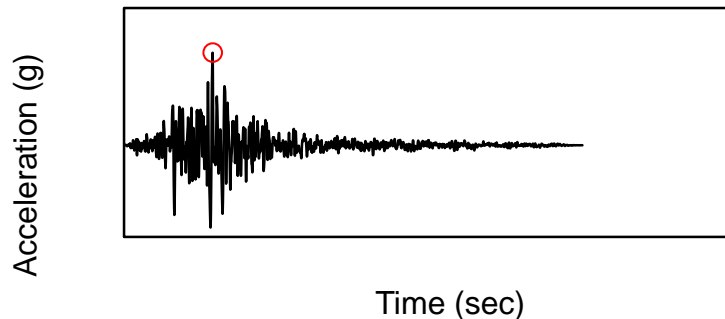
در رابطه فوق ضریب C برای کنترل یکنواختی کرنش معادل در فرکانس‌های مختلف به کار می‌رود. Y_{\max} کرنش برشی حداکثر، $F_{y\max}$ طیف فوریه کرنش برشی و $F_{y\max}$ حداکثر مقدار $F_y(\omega)$ می‌باشد. روش فوق روش خطی معادل وابسته به فرکانس (FDEL= Frequency Dependent Equivalent Linearized technique) نام دارد.

خواص دینامیکی و پروفیل خاک مورد مطالعه

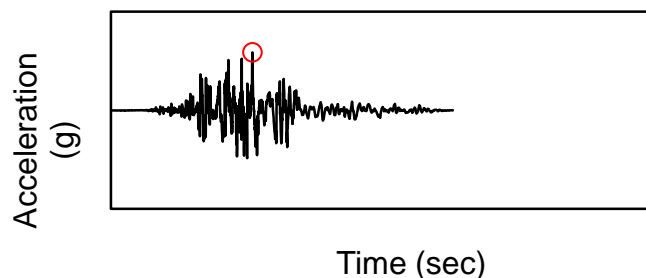
تاریخچه زمانی زلزله San Fernando ثبت شده در ایستگاه Pasadena همان‌طور که در مقاله مرجع [۵] بیان شد به‌عنوان تاریخچه زمانی مرجع انتخاب گردید که شتاب ماکسیمم آن 0.202g می‌باشد و گام زمانی فایل انتخابی 0.1 ثانیه است. دومین شتاب نگاشت ورودی مربوط به زلزله Loma Prieta ثبت شده در ایستگاه ۱۶ LGPC می‌باشد که شتاب ماکسیمم آن 0.605g و گام زمانی فایل انتخابی 0.05 ثانیه است.



ماکسیمم فرکانس‌هایی که ممکن است به علت خطای شتاب نگاشت به وجود بیاید ۲۵ هرتز در نظر گرفته شده و برای فیلتر شدن به برنامه معرفی گردیده است. نتایج حاصل از این مقادیر اصلاح شده به عنوان اطلاعات اصلی در محاسبات مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در ادامه نمودار تاریخچه زمانی زلزله‌های مورد اشاره در بالا، نشان داده شده است.

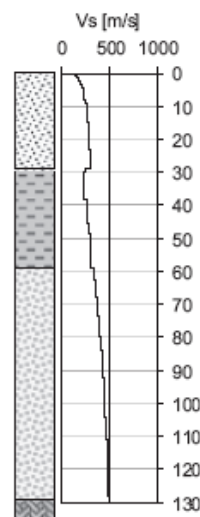


شکل ۱: شتاب نگاشت اول مربوط به زلزله [۵] San Fernando, 1971



شکل ۲: شتاب نگاشت دوم مربوط به زلزله [۵] Loma Prieta, 1989

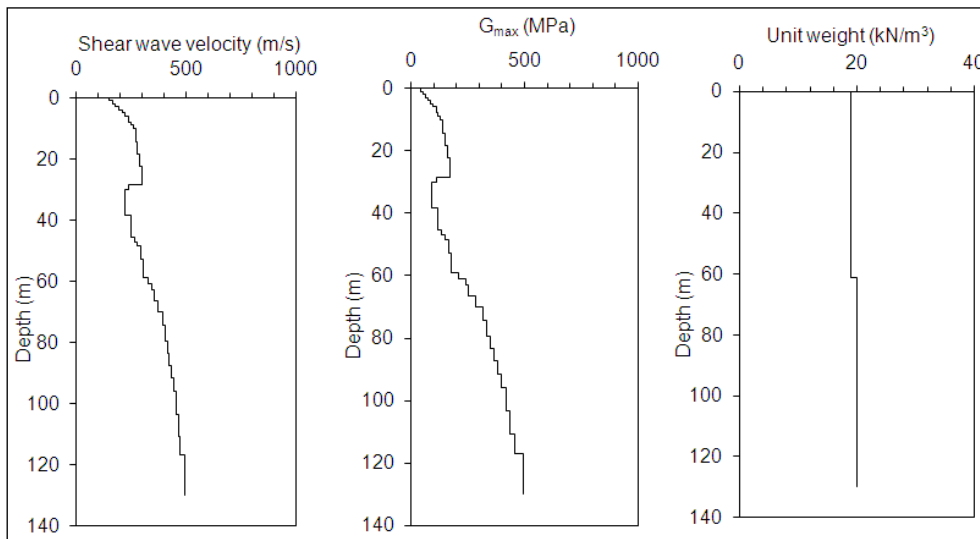
مطابق مقاله مرجع [۵]، مقطع عرضی به صورت یک خاک سه لایه ای در نظر گرفته شده که بر روی سنگ بستر واقع است. پروفیل این خاک در شکل ذیل نشان داده شده است.



شکل ۳: مقطع عرضی خاک مورد مطالعه [۵]

برای سنگ بستر نیاز به تعریف مشخصات آن وجود ندارد چون در قسمت نوع مصالح خاک (Soil Material Type) عدد صفر به آن تخصیص داده می‌شود که به مفهوم مدول برشی و ضریب استهلاک بحرانی ثابت است. وقتی سنگ بستر از مشخصات مقطع عرضی حذف می‌شود و تحلیل انجام می‌گیرد، اعداد به دست آمده در طیف‌های پاسخ و دیگر خروجی‌ها تعدیل می‌شود و در واقع تاثیر زلزله بر روی مقطع خاک کمتر می‌شود که به نظر می‌رسد علت آن تفاوت زیاد بین سرعت موج برشی

در سنگ و خاک می باشد زیرا وقتی برای دو لایه خاک نیز سرعت موج برشی را با تفاوت زیاد تعریف نمائیم، شرایط خروجی ها بحرانی تر می شود. شکل های ذیل مشخصات مصالح ورودی تعریف شده در نرم افزار را نشان می دهند.



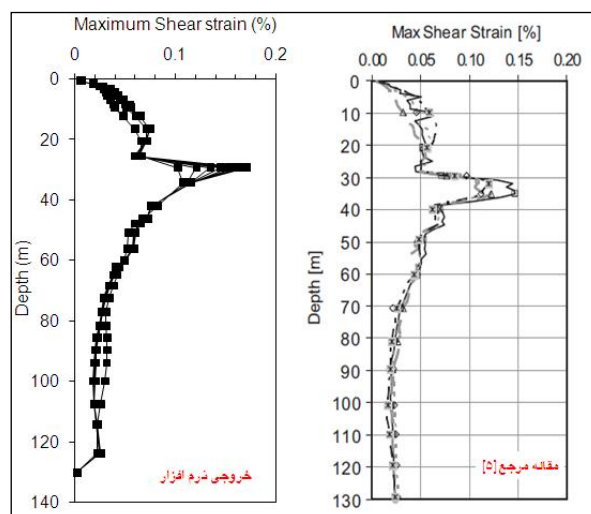
شکل ۴: نمودارهای سرعت موج برشی، مدول برشی ماکسیمم و وزن مخصوص نسبت به عمق

ارزیابی و مقایسه نتایج تحلیل پاسخ زمین

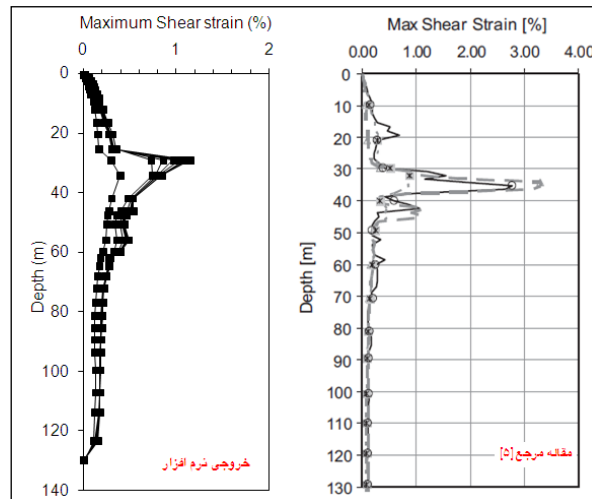
به منظور بهره‌مندی بهتر خواننده از مطالعه مقاله، بهتر است در انتهای مقاله قسمتی برای ارائه نتایج تحقیق در نظر گرفته شود تا ضمن معرفی دستاوردهای پژوهش، چالشهای تحقیق نیز معرفی گردد.

تغییرات حداکثر کرنش برشی نسبت به عمق لایه

پس از اختصاص اطلاعات مربوطه از قبیل تعداد تکرار، ضریب موثر ماکسیمم کرنش برشی و نوع مدول برشی در نرم افزار EERA این برنامه قابلیت ترسیم نمودارهایی که در ادامه نشان داده شده است را دارد. لازم به توضیح است که در این تحقیق از عدد ۸ به عنوان تعداد تکرار استفاده گردید. هم چنین ضریب موثر ماکسیمم کرنش برشی از رابطه $(M-1)/10$ به دست می‌آید که در این تحقیق معادل $0/59$ در نظر گرفته شده است. M در این رابطه شدت زمین لرزه می‌باشد.



شکل ۵: تغییرات حداکثر کرنش برشی نسبت به عمق لایه برای شتاب نگاشت اول



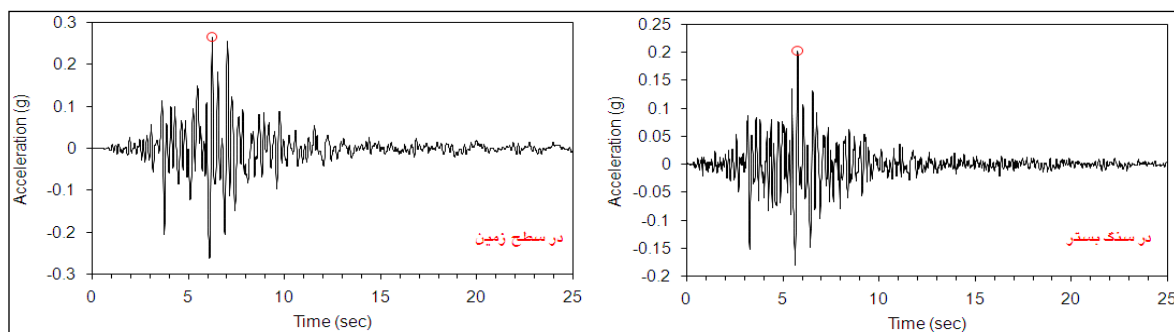
شکل ۶: تغییرات حداکثر کرنش برشی نسبت به عمق لایه برای شتاب نگاشت دوم

از جمله موارد حائز اهمیت که از این نمودارها قابل استخراج است به شرح ذیل می‌باشد:

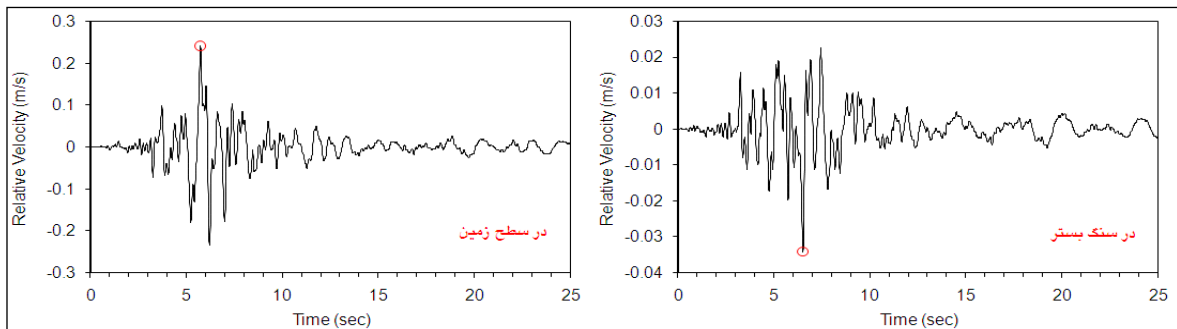
- ۱- برای هر دو شتاب نگاشت در نمودار ماکسیمم کرنش برشی، کرنش ابتدا از سنگ بستر افزایش یافته و در مرز بین لایه ۲ و ۱ (عمق ۳۰ متری) به حداکثر خود می‌رسد که بسیار شبیه به نتایج به دست آمده در مقاله مرجع [۵] می‌باشد.
- ۲- ماکسیمم کرنش برشی در شتاب نگاشت اول به حدود ۰/۱۷ می‌رسد که به مقدار آن در مقاله مرجع (۰/۱۵) نزدیک است ولی در شتاب نگاشت دوم حدود ۱/۳ می‌باشد که تفاوت قابل توجهی با مقدار آن در مقاله مرجع (۲/۶) دارد.
- ۳- نمودار تنش برشی همواره در حال کاهش است.

تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی در سطح زمین و سنگ بستر

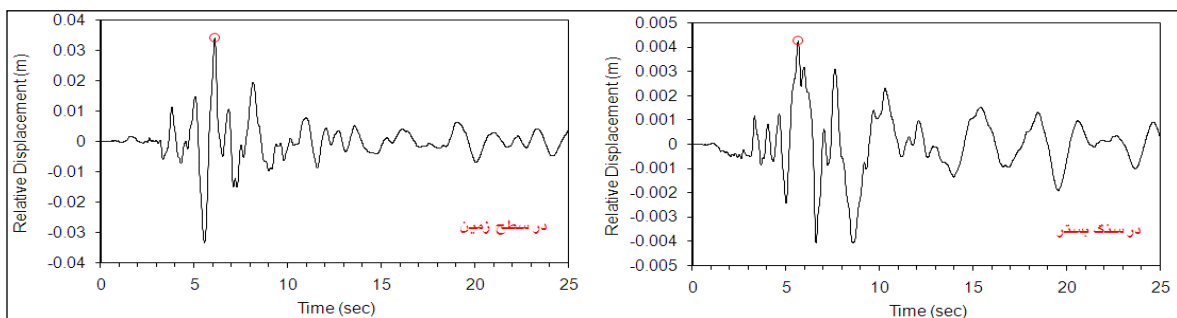
در این تحقیق در ابتدای هر سه لایه خاکی، لایه سطحی و هم‌چنین بستر سنگی محاسبه کار برگ شتاب از برنامه خواسته شده است. کار برگ شتاب برای لایه یک نشان دهنده تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی متناسب با آن می‌باشد که در سطح آزاد محاسبه شده و برای لایه های دیگر نیز همین مقادیر در سطح لایه‌ها داده شده است. در ادامه تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت و جابجایی در سنگ بستر و سطح آزاد برای شتاب نگاشت اول که از نرم افزار استخراج شده است، به عنوان نمونه نشان داده می‌شود.



شکل ۷: تاریخچه زمانی شتاب برای شتاب نگاشت اول



شکل ۸: تاریخچه زمانی سرعت برای شتاب نگاشت اول

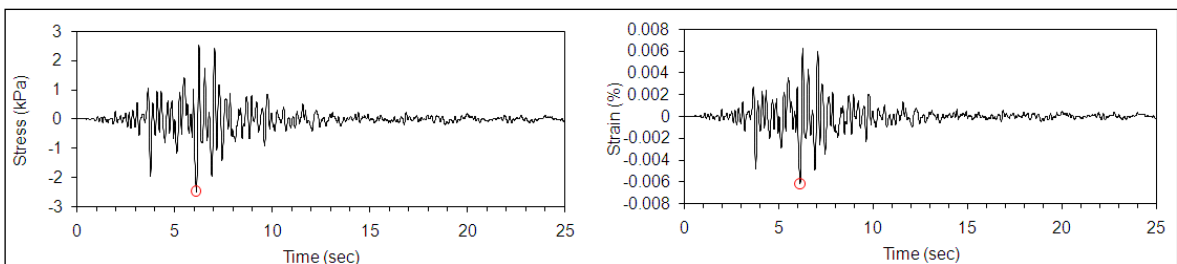


شکل ۹: تاریخچه زمانی جابجایی برای شتاب نگاشت اول

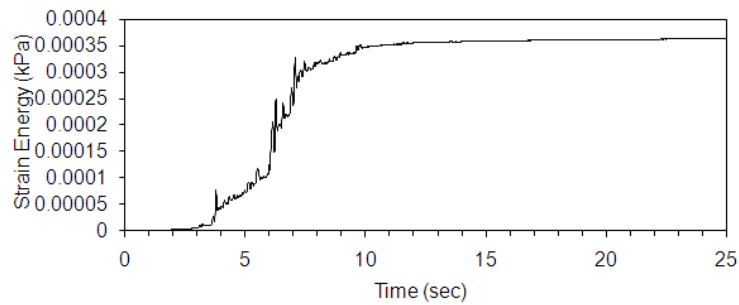
با مقایسه نمودارهای بالا به وضوح دیده می‌شود که میزان شتاب، سرعت و جابجایی در سطح زمین بیشتر از سنگ بستر می‌باشد. این افزایش به ویژه در مورد سرعت و جابجایی بسیار قابل توجه بوده و حدود ده برابر می‌باشد.

تاریخچه زمانی کرنش برشی، تنش برشی و حلقه تنش – کرنش

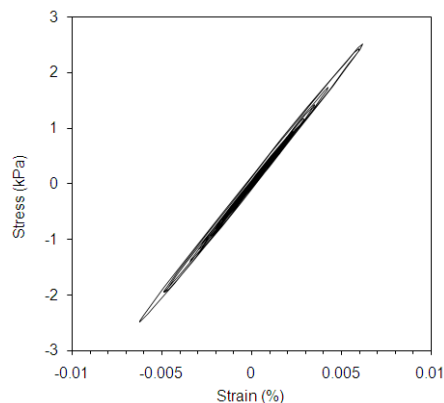
در این بخش مطابق کاربرگ‌های کرنش موجود در نرم افزار، تاریخچه زمانی تنش برشی، کرنش برشی و انرژی تلف شده در واحد حجم و نیز حلقه تنش-کرنش (حلقه های هیستریزیس) استخراج می‌گردد. همان‌طور که می‌دانیم افت انرژی برابر با سطح محصور در داخل این حلقه‌ها خواهد بود. شکل‌های زیر نمودارهای محاسبه شده توسط نرم افزار برای سطح آزاد خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: نمودارهای تاریخچه زمانی تنش و کرنش



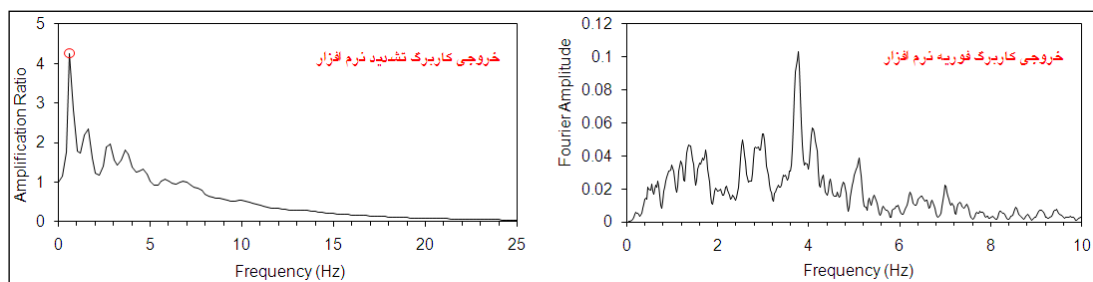
شکل ۱۱: انرژی کرنشی مستهلک شده



شکل ۱۲: حلقه هیستریزس

تشدید و فوریه

نمودار کاربرد تشدید نشان دهنده افزایش میزان محاسبه شده ناشی از نسبت تشدید بین سطح آزاد و لایه پایینی می‌باشد و کاربرد فوریه بیان‌گر محتوای فرکانسی شتاب در سطح آزاد خواهد بود. نمودار فوریه نشان می‌دهد که فرکانس غالب در سطح زمین حدود ۴ هرتز می‌باشد. شکل‌های ذیل خروجی‌های موجود در این کاربردها برای شتاب نگاشت اول را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهند.



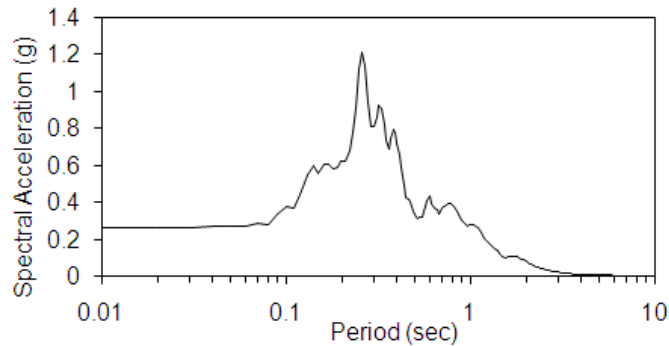
شکل ۱۳: نمودارهای خروجی از کاربردهای تشدید و فوریه برای شتاب نگاشت اول

طیف‌های پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی با میرایی ۵ درصد

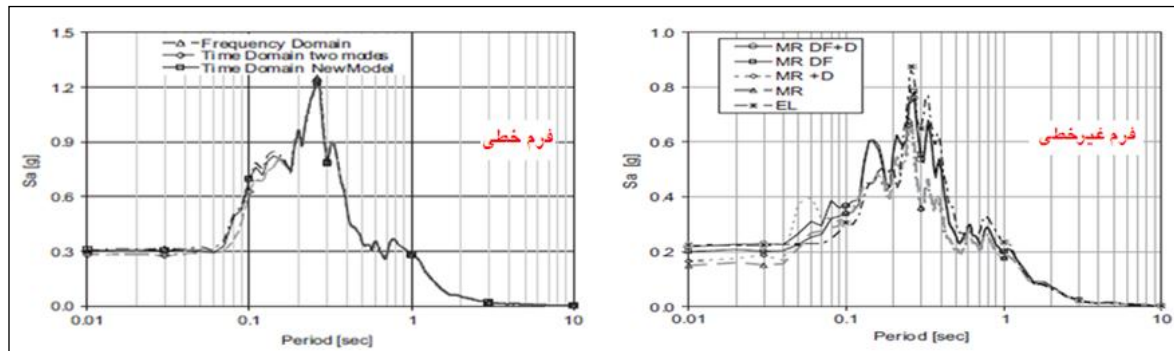
در این تحقیق طیف پاسخ در سطح آزاد (اولین لایه از پروفیل خاک) برای سه نسبت استهلاک بحرانی ۵ و ۱۰ و ۲۰ درصد انجام پذیرفت تا نتایج را با هم مقایسه کنیم. قابل ذکر است که در این کاربرد تاریخچه زمانی شتاب با نسبت استهلاک خواسته شده و سرعت و جابجایی وابسته به آن قابل استخراج می‌باشد. از مقایسه نتایج نسبت‌های استهلاک ۵ و ۱۰ و ۲۰ درصد داریم. الف- با افزایش نسبت استهلاک بحرانی ماکسیمم پاسخ شتاب به شدت کاهش می‌یابد هم‌چنین ماکسیمم سرعت نیز کاهش خواهد یافت ولی ماکسیمم جابجایی به نسبت شتاب، تغییر کمتری می‌کند.

ب- مشاهده می شود که نمودارها در هر سه مورد شبیه به هم بوده و ماکسیمم سرعت و جابجایی زمانی رخ می دهد که شتاب تقریباً مینیمم مقدار خود را دارد.

در ادامه فقط نمودارهای نسبت استهلاک ۵ درصد، از خروجی نرم افزار به عنوان نمونه آورده شده است (در مقاله مرجع [۵] مقدار میرایی ۵ درصد فرض شده است). این نمودارها با نمودار پاسخ شتاب برای میرایی ۵ درصد از مقاله مرجع مقایسه می شوند.

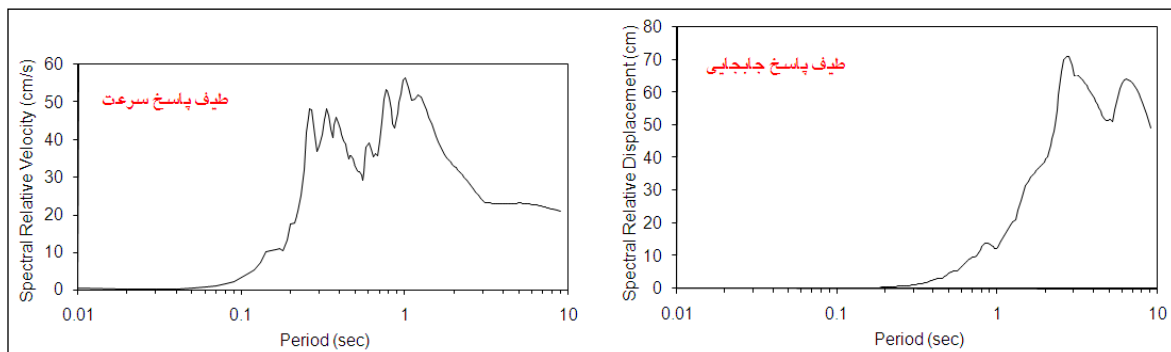


شکل ۱۴: خروجی نرم افزار برای طیف پاسخ شتاب در سطح زمین



شکل ۱۵: فرم خطی و غیرخطی طیف پاسخ شتاب در مقاله مرجع [۵]

با بررسی دو شکل اخیر ملاحظه می شود که خروجی نرم افزار Eera که یک نرم افزار خطی معادل است، به حالت محاسبه شده با فرم خطی در مقاله مرجع [۵] نزدیک تر است. از دیگر خروجی های موجود در این بخش از نرم افزار، طیف های پاسخ سرعت و جابجایی می باشد که برای سطح آزاد و استهلاک ۵ درصد به صورت شکل زیر نشان داده می شود.



شکل ۱۶: خروجی نرم افزار برای طیف های پاسخ سرعت و جابجایی در سطح زمین

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نتایج آنالیز ساختگاه مطابق زلزله San Fernando, 1971 به‌عنوان اولین شتاب نگاشت و نیز زلزله Loma Prieta, 1989 به‌عنوان دومین شتاب نگاشت [۵] مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل بیان می‌گردد:
برای ماکسیمم کرنش برشی در هر دو شتاب نگاشت، مقادیر خروجی کرنش بسیار شبیه به نتایج به دست آمده در مقاله مرجع [۵] می‌باشد.

نمودار تنش برشی همواره در حال کاهش است.
میزان شتاب، سرعت و جابجایی در سطح زمین بیشتر از سنگ بستر می‌باشد. این افزایش برای سرعت و جابجایی حدود ده برابر می‌باشد.
فرکانس غالب در سطح زمین که از نمودار فوریه استخراج شده است، حدود ۴ هرتز می‌باشد.
با افزایش نسبت استهلاک بحرانی ماکسیمم پاسخ شتاب و سرعت کاهش می‌یابند ولی ماکسیمم جابجایی به نسبت شتاب، تغییر کمتری می‌کند.
ماکسیمم طیف پاسخ سرعت و جابجایی هنگامی اتفاق می‌افتد که شتاب تقریباً مینیمم مقدار خود را دارد.
طیف پاسخ شتاب خروجی از نرم افزار، به حالت محاسبه شده با فرم خطی در مقاله مرجع [۵] نزدیک‌تر است.

فهرست مراجع

- Furumoto Y, Sugito M and Yashima A (1996) Frequency-Dependent Equivalent Linearized Technique for FEM Response Analysis of Ground, *11th World Conference on Earthquake Engineering*, No. 1806/5/A
- Hashash YMA and Phillips C (2009) Damping Formulation for Nonlinear 1D Site Response Analyses, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 1143-1158
- Idriss IM and Seed HB (1968) Seismic Response of Horizontal Soil Layers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No. 4, pp. 1003–1031
- Kramer SL (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 254-280
- Yoshida N, Kiku H and Towhata I (1999) An Improvement of Effective Stress Dynamic Response Analysis Code YUSAYUSA, *The 34th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 2105-2106