

### چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر تغییرات انرژی کرنشی بر الگوهای بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای زمین‌های مستعد روانگرایی پرداخته شده است. در این راستا، طیف گسترده‌ای از زلزله‌ها بر اساس روش غیرخطی مبتنی بر دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در فضای زمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور پارامتر وابسته به انرژی کرنشی تجمعی جهت در نظر گرفتن اثرات مدت زمان لرزش زلزله و ضخامت لایه که در آن اضافه فشار آب حفره‌ای تولید می‌شود، معرفی شده است. در گام نخست، مقادیر و تغییرات فشار آب حفره‌ای و طیف‌های پاسخ در اعماق مختلف ماسه نودا با استفاده از نتایج آزمایش مدل شماره یک سانتریفیوژ پروژ و لکس و به کمک نرم‌افزار CYCLICID مورد بررسی قرار گرفته و بدین وسیله اعتبارسنجی حل عددی نرم‌افزار با دقت مناسبی صورت پذیرفته است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که در اثر وجود لایه‌های مستعد روانگرایی، مقادیر بالای انرژی کرنشی تجمعی و ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای، موجب تغییرات محسوس الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین می‌شوند. همچنین الگوهای به‌دست آمده مبتنی بر تحلیل تنش مؤثر با اعمال افزایش فشار آب حفره‌ای با مقایسه الگوهای بزرگنمایی ناشی از تحلیل تنش کل تفاوت‌های زیادی دارد.

**کلمات کلیدی:** اثرات ساختگاه، انرژی کرنشی تجمعی، فشار آب حفره‌ای، الگوی بزرگنمایی، روانگرایی، تحلیل غیرخطی

## مدل‌سازی عددی پاسخ لرزه‌ای زمین‌های نرم مستعد روانگرایی بر اساس رویکرد انرژی کرنشی تجمعی

حمید علی‌الهی (نویسنده مسؤول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان،

زنجان، ایران

Email: [h.alielahi@iauz.ac.ir](mailto:h.alielahi@iauz.ac.ir)

محمد آدم پیراء

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

محمد غبرائی لنگرودی

کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی

واحد زنجان، زنجان، ایران

### 1- مقدمه

زمین‌های نرم توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است، اما با توجه به کمبودها و محدودیت‌های موجود در این نوع از ساختگاه‌ها، در بسیاری از آیین‌نامه‌های مرسوم ساختمانی، نیاز به تحلیل‌های ویژه ساختگاهی در مناطق با قابلیت روانگرایی بیش از پیش نمایان می‌شود.

در این راستا زقال و الگمل [2] از جمله اولین کسانی بودند که نشان دادند تولید فشار آب حفره‌ای در ساختگاه وایلد لایف در سطح پایینی از لرزش همراه با نرم‌شدگی خاک بوده است. چند سال بعد یانگ و همکاران [3-4] نیز تحلیل‌های عددی بسیاری را بر روی خاک‌های رسوبی روانگرا با هدف روشن شدن اثرات روانگرایی لایه‌های خاک بر پاسخ لرزه‌ای زمین انجام داده و نشان دادند که دامنه و محتوای فرکانسی حرکات

زلزله‌ها در 50 سال اخیر نشان داده‌اند که نقش اثرات ساختگاه<sup>1</sup> در توزیع و بزرگی خسارات مرتبط با یک رویداد لرزه‌ای بسیار مؤثر است. رویدادهای لرزه‌ای مانند لوماپریتا 1989، نورتریج 1994، کوبه 1995 و زلزله‌ی چی‌چی 1999 شاهدهی بر اهمیت اثر نوع زمین‌شناسی محلی و شرایط مختلف لایه‌های خاک به‌ویژه خاک‌های نرم با رفتار غیرخطی بر پاسخ لرزه‌ای زمین می‌باشند [1]. از طرف دیگر، قرار گرفتن بسیاری از مناطق شهری در نواحی با خطر لرزه‌خیزی زیاد و مستعد بودن شرایط روانگرایی خاک در بسیاری از مناطق ساحلی و نواحی با سطح آب زیرزمینی بالا، رفع کمبودهای آیین‌نامه‌ای در چهارچوب مطالعات عددی را ایجاب می‌کند. اگرچه اثر رفتار خاک در حالت نرم‌شونده و غیرخطی بر پاسخ لرزه‌ای سطح

همچون نعمت - ناصر و شکوه [12] با اتکا بر آزمایش‌های آزمایشگاهی موفق شدند برای اولین بار رابطه‌ای میان فشار منفذی و انرژی کرنشی تلف شده در خاک ارائه کنند. مدل تولید فشار آب حفره‌ای توسط گرین و همکاران [13-14] بر اساس روش انرژی پیشنهاد شد. علاوه بر این در تحقیق بازیار و جعفریان [15] از مفهوم انرژی کرنشی جهت ارزیابی مقاومت روانگرایی خاک‌ها استفاده شده است. در ادامه، جعفریان و همکاران [16] ارتباطی منطقی بین نتایج تحلیل‌های عددی و مشاهدات میدانی خاک‌های روانگرا پیشنهاد نمودند. آنها همچنین یادآور شدند که انرژی کرنشی توانایی بیشتری به منظور ارزیابی پتانسیل خاک‌های روانگرا نسبت به روش‌های مرسوم تنش و کرنش تناوبی دارد. کوشو [17] با توجه به داده‌های آزمایش سه محوری تناوبی، روشی بر اساس انرژی کرنشی - جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارائه نمود. به همین ترتیب، ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک ماسه‌ای اشباع بر مبنای اصول اتلاف انرژی غیرخطی توسط چن و همکاران [18] با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که انرژی به دست آمده از حلقه هیستریزس نقش مؤثری می‌تواند در ارزیابی پتانسیل روانگرایی ایفا کند؛ زیرا رابطه غیرخطی بین افزایش فشار آب حفره‌ای و انرژی امواج لرزه‌ای به خوبی مشاهده شده است.

از دیدگاه انرژی، روانگرایی فرآیندی است که منجر به گسیختگی ساختاری اسکلت خاک در اثر برش حاصل از جذب انرژی کرنشی می‌شود [13]. تاکنون تمامی روابطی که برای محاسبه و تخمین سهم بار رسیده به خاک ناشی از عامل تحریک زلزله ارائه شده‌اند، بر اساس روابط تجربی بوده است. این سؤال که بخشی از انرژی جذب شده توسط خاک‌های نرم چه رابطه‌ای با پارامترهای لرزه‌خیزی و اثرات ساختگاهی ناشی از مدل تنش مؤثر دارد، می‌تواند با انجام تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گیرد.

با بررسی مطالعات انجام شده مشاهده می‌شود که تاکنون شماری از محققان رفتار خاک در حالت نرم‌شونده و اثر

زمین وابسته به سطح لرزش و رفتار غیرخطی خاک است. به همین ترتیب یاد و کارتر [5] حرکات ثبت شده‌ی زمین را در چهار ساختمان با قابلیت روانگرایی مورد بررسی قرار دادند. آنها یادآور شدند که تحلیل‌های ویژه‌ی پاسخ ساختمان به خصوص برای سازه‌هایی با پی‌رود بلند الزامی می‌باشد. نسبت بزرگنمایی طیفی در ساختمان‌های با پتانسیل تولید فشار آب حفره‌ای توسط ژائو و ژانگ [6] مورد بررسی قرار گرفته است. کرامر و همکاران [7] با نگاهی ویژه به مسئله‌ی روانگرایی و اثر آن بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، ساختمان وایلدلایف را بر مبنای روش تنش مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آنها، تنها از پارامتر شتاب حداکثر زلزله به عنوان شاخص حرکت نیرومند زمین استفاده شده است و دیگر پارامترهای تأثیرگذار نظیر مدت زمان لرزش و انرژی زلزله در محاسبات لحاظ نشده است. ژانگ و لونا [8] اثر لایه‌های عمیق روانگرا بر بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای زمین را مورد تحقیق قرار دادند. از سوی دیگر مطالعه‌ای بر روی خاک ماسه‌ای اشباع جهت ارزیابی تأثیرات قدرت لرزش بر پاسخ لرزه‌ای زمین‌های مستعد روانگرایی توسط سو و همکاران [9] انجام پذیرفته است. این محققین طیف‌های پاسخ به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که در هر مرحله‌ای که خاک تحت لرزش خفیف‌تر باشد، بزرگنمایی افزایش می‌یابد. گروهلوسکی و همکاران [10] مطالعه‌ای جهت بررسی اثر فشار آب حفره‌ای در پروفیل خاک نرم بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان وایلدلایف تحت اثر تحریک زلزله ارائه کردند. اخیراً نیز آدم پیرا و همکاران [11] به مقایسه‌ی روش‌های تحلیل لرزه‌ای پاسخ ساختمان در خاک‌های نرم مستعد روانگرایی تحت اثر زلزله‌های میدان نزدیک پرداختند. این محققین نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن اضافه فشار آب حفره‌ای به صورت مستقیم در تحلیل اثرات ساختگاهی، تأثیر به‌سزایی در تمام محدوده‌های پی‌رودیک به‌ویژه در پی‌رودهای بلند خواهد داشت.

با توسعه و پیشرفت روش‌های عددی، استفاده از روش انرژی در ارزیابی اضافه فشار آب حفره‌ای و همچنین تغییر شکل‌های ناشی از آن مقبولیت زیادی یافته است. پیشگامانی

حفره‌ای بنا نهاده شده‌اند که این امر با توجه به کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در این نوع از خاک‌ها با رفتار واقعی خاک تطابق دارد. به‌منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی در برآورد پاسخ لرزه‌ای زمین به نرم‌افزارهای متعددی نظیر FLAC، DEEPSOIL، D-MOD و CYCLIC1D می‌توان اشاره نمود. در این بین نرم‌افزار CYCLIC1D [19] یک برنامه‌ی اجزای محدود غیرخطی مبتنی بر مدل‌های تنش کل و مؤثر بوده و می‌تواند برای تعیین بزرگنمایی یک‌بعدی ساختگاه، شبیه‌سازی روانگرایی و بررسی اثرات آن در زمین‌های افقی و تقریباً شیب‌دار مورد استفاده قرار گیرد. در این برنامه رفتار تنش-کرنش خاک به‌وسیله‌ی یک مدل رفتاری پیشرفته کنترل می‌گردد که در آن ساختار کلی پلاستیسته چند سطح تسلیمی مورد استفاده قرار گرفته است.

بر پایه چهارچوب پلاستیسته چند سطحی، مدل‌های رفتاری گسترش‌یافته‌ای توسط الگمل و همکاران ارائه شدند [19] که در آنها مشخصه‌های پاسخ تحرک تناوبی مجدداً به‌وسیله یک قانون جریان جدید (غیرهمبسته) بازنویسی شده است. این مدل‌های رفتاری در کدهای اجزای محدود از قبیل CYCLIC1D به کار رفته‌اند، به‌طوری‌که سه مؤلفه‌ی اصلی این مدل شامل تابع تسلیم، قانون سخت‌شوندگی و قانون جریان می‌باشند. توابع تسلیم انتخاب‌شده در این مدل شامل یک سطح مخروطی در فضای تنش بوده (شکل 1-الف) و قله آن در امتداد محوری هیدرواستاتیکی قرار دارد. در تاریخچه پلاستیسته چند سطحی، تعدادی از سطوح تسلیم مشابه به همراه قله‌های مشخص و اندازه‌های متفاوت، منطقه سخت‌شوندگی را تشکیل می‌دهند (شکل 1-ب) که پوش گسیختگی را در بر می‌گیرد. همچنین، قانون سخت‌شوندگی جنبشی<sup>3</sup> به منظور ایجاد پاسخ هیستریزس تحت بارگذاری برشی تناوبی در این مدل لحاظ شده است. این قانون، اصلاح شده قانون اولیه مروز [20-21] بوده که به منظور بهبود توانمندی عددی در مدل یاد شده اعمال شده است. لازم به ذکر است که منظور از سخت‌شوندگی جنبشی، جابه‌جایی و انتقال سطوح تسلیم در فضای تنش به همراه پوش خرابی آنها می‌باشد.

غیرخطی شدن خاک را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد بررسی قرار داده‌اند. این در حالی است که در الگوهای موجود ملاحظات اثرات ساختگاهی برای خاک‌های نرم یا بر اساس روش تنش کل بوده و یا مدل اضافه فشار آب حفره‌ای با رفتار مناسبی لحاظ نشده است. همچنین مؤثرترین عوامل از جمله اثرات مدت‌زمان لرزش زلزله، عمق لایه تولیدکننده فشار آب حفره‌ای و نیز ملاحظات اثرات ساختگاهی بر مبنای انرژی کرنشی مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین علت، هدف این تحقیق استخراج چارچوب رفتاری مناسب جهت بررسی رفتار خاک در حالت نرم‌شونده و لایه‌های خاک مستعد روانگرایی بر الگوهای بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌باشد؛ بنابراین به جهت برآورد نقش انرژی کرنشی در تغییرات الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح پروفیل خاک با استفاده از روابط ریاضی و با انتگرال ساده از زمان لرزش و عمق، پارامتر جدیدی وابسته به انرژی کرنشی<sup>2</sup> که تابعی از تنش و کرنش برشی، مدت‌زمان مؤثر زلزله و عمق لایه روانگرا می‌باشد، پیشنهاد شده است. در این راستا طبق محدوده‌های مختلف این پارامتر، بزرگنمایی لرزه‌ای زمین‌های مستعد نرم‌شوندگی با قابلیت روانگرایی در اثر اعمال 400 رکورد زلزله مبتنی بر روش غیرخطی با دو مدل تنش کل و تنش مؤثر در فضای زمان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته تا به نحوی پاسخگوی کمبودهای مربوطه و عدم موفقیت مطالعات پیشین در این زمینه باشد. برای این منظور از نرم‌افزار CYCLIC1D مبتنی بر مدل رفتاری پلاستیسته با سطح تسلیم چندگانه تهیه‌شده توسط الگمل و همکاران [19] در تحقیق حاضر استفاده شده است.

## 2- مدل‌سازی عددی

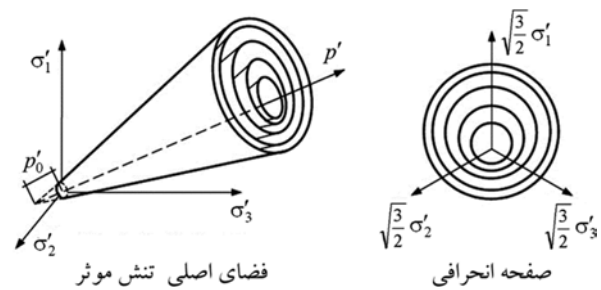
رفتار مصالح در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری تحت ارتباط بین تنش و کرنش تعریف و مشخص می‌شوند. این مدل‌های رفتاری هسته‌ی اصلی روش‌های عددی را تشکیل می‌دهند. تقریباً تمامی مدل‌های رفتاری برای خاک‌های مستعد روانگرایی بر پایه‌ی پلاستیسته با مدل‌سازی فشار آب

$Q$  عملگر گرادیان مجزا جهت همبستگی فازهای جامد و مایع، بردار فشار حفره‌ای،  $H$  ماتریس نفوذپذیری و  $S$  ماتریس تراکم‌پذیری می‌باشند. در این راستا پارامترهای  $f^p$  و  $f^s$  به جهت معرفی اثرات نیروهای حجمی<sup>5</sup> و شرایط مرزی اعمالی برای فازهای جامد-مایع و مایع تعیین شده‌اند.

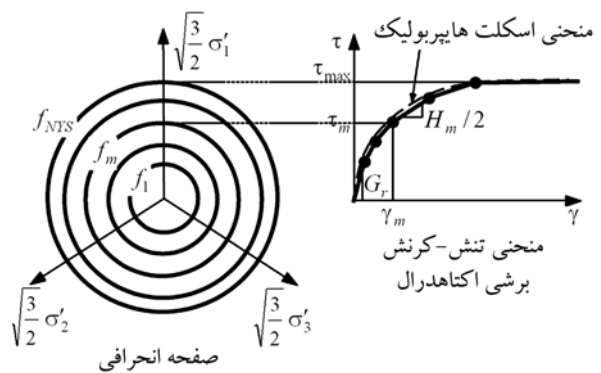
در این تحقیق در مرحله اول بر اساس پارامترهای به‌دست آمده از اعتبارسنجی الگمل و همکاران تولید اضافه فشار آب حفره‌ای به کمک نرم‌افزار یک‌بعدی آنالیز پاسخ ساختگاه CYCLIC1D انجام شده است. سپس طیف‌های پاسخ در عمق و سطح پروفیل خاک نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا بدین وسیله اعتبارسنجی حل عددی نرم‌افزار با دقت و تطابق مناسبی صورت گیرد. در گام بعد، به معرفی پارامتر جدیدی که تابعی از تنش و کرنش برشی، مدت زمان مؤثر زلزله و عمق لایه روانگرا می‌باشد، پرداخته شده است. پارامتر یاد شده به جهت برآورد نقش انرژی کرنشی در تغییرات الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح پروفیل خاک پیشنهاد شده است.

### 3- اعتبارسنجی مدل عددی

از اهداف پروژه ولکس انجام آزمایش‌های دینامیکی سانتی‌فیوژ در انواع مدل‌های مختلف خاک اشباع برای بررسی مکانیسم روانگرایی در شرایط انتشار امواج یک‌بعدی و استفاده از نتایج حاصل از این آزمایش‌ها به منظور صحت‌سنجی مدل‌های مختلف رفتاری و عددی بوده است. به سبب استفاده از ماسه معروف نوادا در آزمایش سانتی‌فیوژ، با بررسی ادبیات فنی مشخصات پارامترهای ورودی تعیین گردید. در این راستا مدل شماره 1 سانتی‌فیوژ پروژه ولکس با مقیاس 50 g، با کمک نرم‌افزار CYCLIC1D در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای صحیح مورد نیاز مدل چند سطح تسلیمی برای ماسه نوادا با توجه به داده‌های موجود در تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار گرفته است [26]. مطابق جدول (1)، پروفیل خاک روانگرایی مورد نظر در مدل شماره 1 شامل یک لایه افقی از ماسه نوادا با دانسیته 40% و وزن مخصوص اشباع 19/25 کیلونیوتن بر متر مربع



شکل (1-الف): سطح تسلیم مخروطی در فضای تنش اصلی و صفحه انحرافی



شکل (1-ب): منحنی هایپربولیک پاسخ غیرخطی تنش-کرنش خاک به همراه نمایش خطی‌سازی قطعه‌ای در پلاستیسیته چند سطحی

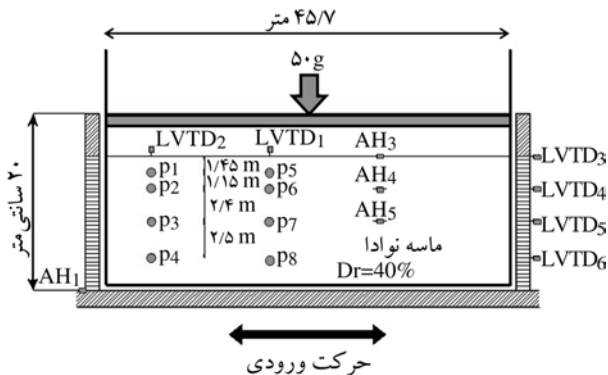
مدل یاد شده در حالت رفتار انقباضی خاک<sup>4</sup>، اضافه فشار آب حفره‌ای را بر اساس کاهش نرخ تنش مؤثر محاسبه می‌کند [19]؛ به طوری که خاک‌های اشباع، به صورت مصالح دوفازی مبتنی بر تئوری بيو [22] برای محیط متخلخل مدل می‌شوند. فرمولاسیون عددی این تئوری که در این نرم‌افزار به کار بسته شده است، با نام فرمولاسیون جابه‌جایی-فشار حفره‌ای (u-p) توسط چان [23] و زینکوویچ [24] ارائه شده است. این فرمولاسیون در روش اجزای محدود به صورت زیر تعریف می‌شود [25]:

$$M \dot{U} + \int B^T \sigma' dW + Qp - f^s = 0 \quad (1)$$

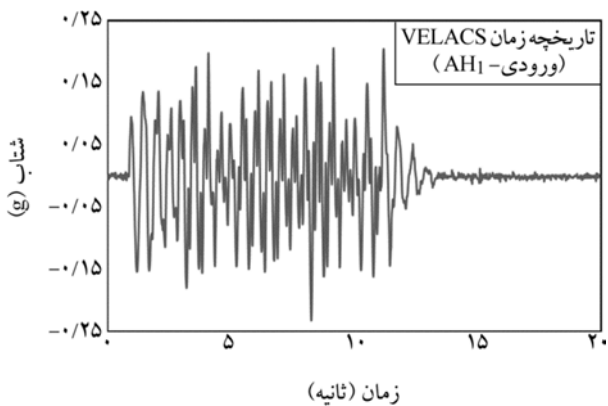
به طوری که در این رابطه  $M$  ماتریس جرم،  $u$  بردار جابه‌جایی و  $B$  ماتریس کرنش جابه‌جایی می‌باشند. به همین ترتیب،  $\sigma$  نماینده بردار تنش مؤثر بوده که با استفاده از مدل مشخصه ارائه شده در رابطه (2) قابل محاسبه می‌باشد.

$$Q^T U + S p + H p - f^p = 0 \quad (2)$$

عددی در ارزیابی تولید فشار آب حفره‌ای، تحلیل وقوع روانگرایی و پاسخ‌های سطح زمین می‌باشد.



شکل (2): نمای شماتیک مدل آزمایش شماره 1 سانتریفیوژ ولکس [27]



شکل (3): تاریخچه شتاب - زمان مورد استفاده در مدل آزمایش سانتریفیوژ ولکس [27]

لازم به ذکر است در مدل‌سازی‌های عددی، میرایی به صورت ضریب میرایی رایلی 5% به ازای فرکانس‌های 1 و 6 هرتز مطابق رابطه زیر محاسبه و اعمال شده است.

$$C = A_m M + A_k K \quad (3)$$

در این روابط،  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس جرم، ماتریس میرایی و ماتریس سختی می‌باشد. به همین ترتیب  $A_m$  و  $A_k$  پارامترهای میرایی رایلی بوده که با استفاده از روابط (4) و (5) قابل محاسبه می‌باشند.

$$\xi = \frac{A_m}{4\pi f_1} + A_k \pi f_1 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{A_m}{4\pi f_2} + A_k \pi f_2 \quad (5)$$

می‌باشد [26]. همچنین در جدول (2) نیز پارامترهای مدل کالیبره شده برای ماسه نوادا (دانسیته 40 درصد) ارائه شده است.

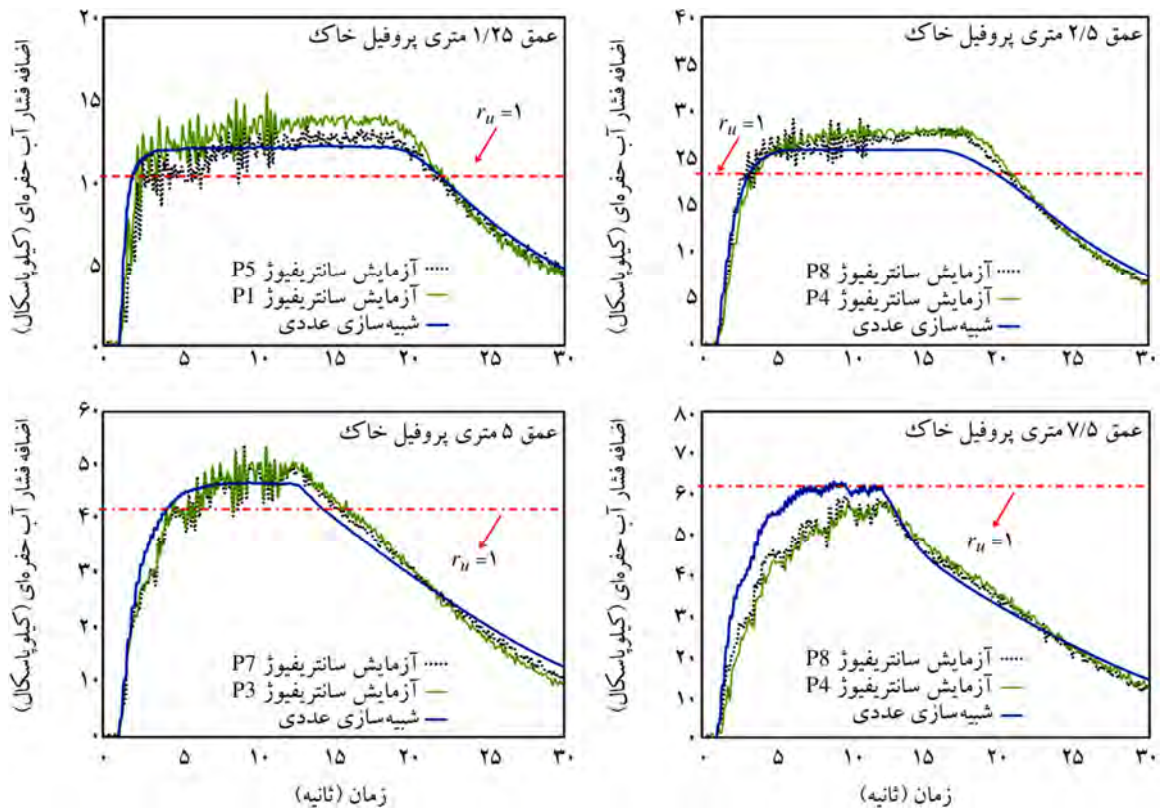
جدول (1): پارامترهای ماسه نوادا [26]

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص اشباع	کیلونیوتن بر متر مکعب	19/25
وزن مخصوص خشک	کیلونیوتن بر متر مکعب	15/07
دانسیته	درصد	40
تخلخل	-	0/74
چگالی	-	2/68

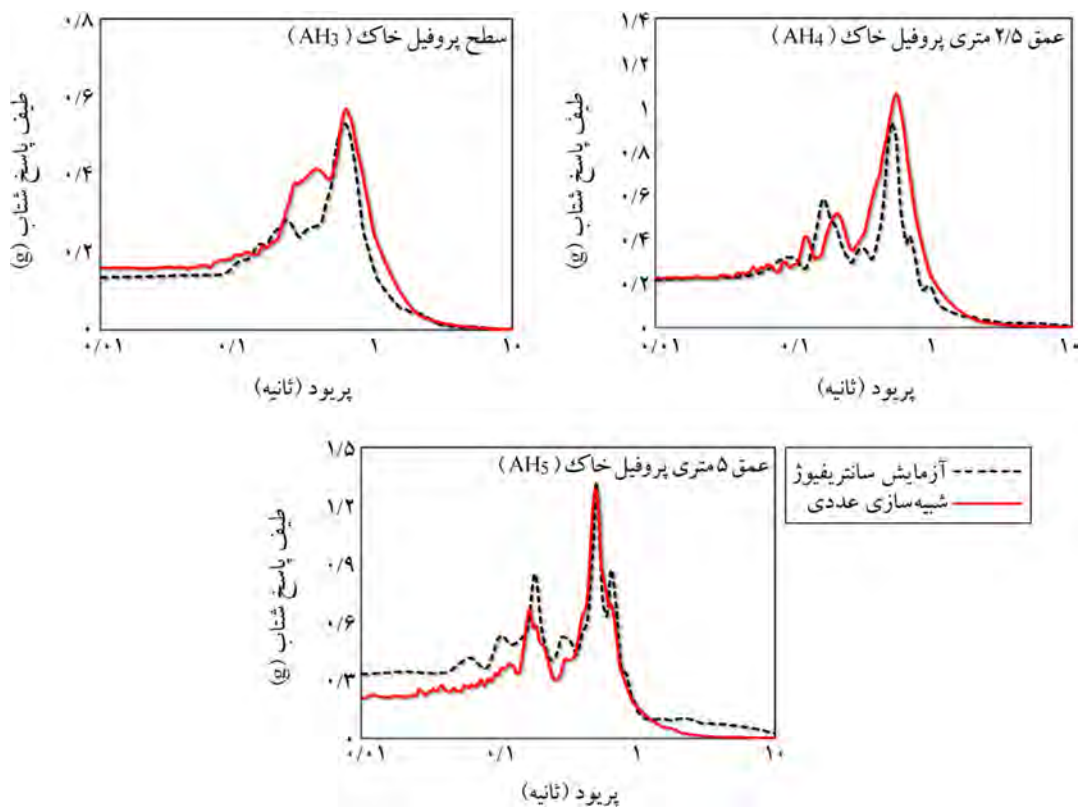
جدول (2): پارامترهای مدل کالیبره شده برای ماسه نوادا (دانسیته 40%) [19]

مقدار	پارامتر	آزمایش‌های کالیبراسیون اصلی
33/3MPa	مدول برشی (Gr)	آزمایش تحکیم فشاری زهکشی شده (CDC)
31/4°	زاویه اصطکاک ( $\phi$ )	RPI Centrifuge
80kPa	فشار متوسط مرجع ( $P_0$ )	
0/5	ضریب وابسته به فشار	
26/5°	زاویه تغییر فاز ( $\phi_{pi}$ )	
0/17	پارامتر انقباض ( $C_1$ )	
0/05	پارامتر انقباض ( $C_2$ )	
0/4	پارامتر اتساع ( $d_1$ )	
130	پارامتر اتساع ( $d_2$ )	

در اشکال (2) و (3) به ترتیب مدل آزمایش سانتریفیوژ به همراه محل قرارگیری پیژومترها و نمای شماتیکی از تاریخچه زمانی شتاب مربوط به این آزمایش نشان داده شده است [27]. همچنین در اشکال (4) و (5) نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای و طیف‌های پاسخ در پروفیل خاک به دو حالت اندازه‌گیری شده (آزمایش سانتریفیوژ) و شبیه‌سازی شده (مدل عددی) مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج آزمایش سانتریفیوژ و مدل عددی این تحقیق وجود دارد که حاکی از صحت و دقت مناسب مدل



شکل (4): مقایسه نتایج نحوه تولید فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف پروفیل خاک روانگرا در آزمایش ساترئیفیوژ پروژه VELACS و مدل عددی CYCLIC1D



شکل (5): مقایسه نتایج طیف پاسخ به دست آمده در آزمایش ساترئیفیوژ پروژه VELACS و مدل عددی CYCLIC1D

#### 4- روش کلی تحقیق

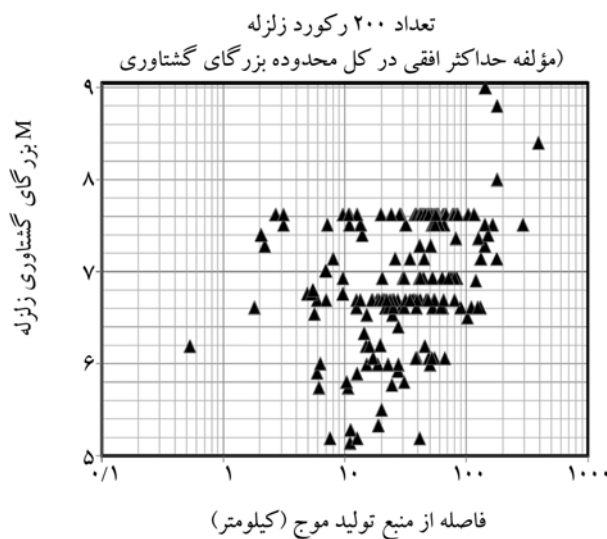
##### 4-1- روش‌های تحلیل پاسخ زمین

یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در ژئوتکنیک لرزه‌ای، روش‌های تحلیل یک‌بعدی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه می‌باشند. این روش‌ها را می‌توان به دو بخش اصلی شامل تحلیل‌های مبتنی بر تنش کل (معادل خطی و غیرخطی تنش کل) و تحلیل‌های مبتنی بر تنش مؤثر تقسیم نمود. با توجه به این که رفتار تنش-کرنش خاک‌های نرم مستعد ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای از پیچیدگی‌های خاصی برخوردارند، اما در اکثر مطالعات عرف لرزه‌خیزی انجام شده از آنالیز پاسخ ساختگاه بر اساس روش تنش کل یا روش معادل خطی بدون لحاظ اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای در حین زلزله استفاده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی مدل‌های غیرخطی اعم از تنش کل و مؤثر، توانایی برآورد کرنش‌های دائمی می‌باشد [1]. البته بدیهی است که میزان صحت نتایج در این روش به انتخاب مناسب مدل رفتاری و کفایت نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مدل خاک بستگی دارد. نکته قابل توجه اینکه تحلیل‌ها مبتنی بر روش تنش کل توانایی برآورد مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از حرکت لرزه‌ای زمین برای کنترل رفتار زمین‌های نرم و مطابقت با واقعیت این نوع از خاک‌ها را ندارد [11]. از این رو استفاده از شیوه تنش مؤثر برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای خاک‌های روانگرا امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد، چرا که در آن اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارهای لرزه‌ای به صورت مستقیم اعمال می‌گردد. در نتیجه بدیهی است که استفاده از روش تنش مؤثر در صورت وجود اطلاعات کافی از خصوصیات دینامیکی ساختگاه، تخمین نسبتاً دقیقی از پاسخ خاک در اثر تحریک زلزله و منطبق بر واقعیت رفتار خاک دارد.

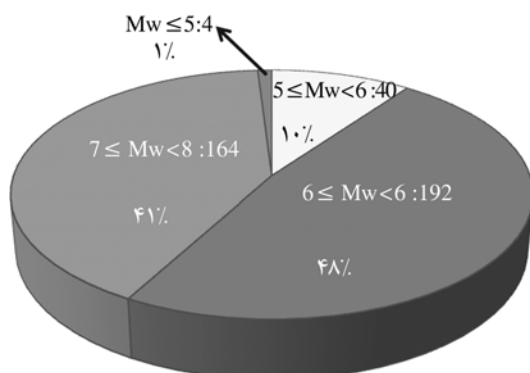
##### 4-2- انتخاب رکوردهای زلزله

در این تحقیق به منظور کاربردی‌تر نمودن و پوشش کامل به محدوده نتایج، به تأثیر زلزله‌های مختلف در بازه‌ی بزرگ‌گام‌های متفاوت بر پاسخ لرزه‌ای خاک‌های نرم با پتانسیل ایجاد اضافه فشار

آب حفره‌ای پرداخته شده است. به همین منظور، مطابق جدول (3) جهت شناخت صحیح رفتار لرزه‌ای پروفیل مدل شده از 400 رکورد زلزله (200 زلزله در دو جهت مؤلفه افقی) با بازه بزرگ‌گام بین 5 تا 9 استفاده شده است. لازم به ذکر است رکورد زلزله‌های مذکور از پایگاه بانک داده‌ای PEER<sup>6</sup> اخذ و دقت لازم انجام شده است؛ به طوری که از نظر نوع گسلش، انرژی، تغییرات بزرگ‌گام، شتاب حداکثر در سنگ‌بستر و فاصله منبع تا محل توزیع کافی را دارا باشند، جدول (3). همچنین تمامی ایستگاه‌های شتاب‌نگاری با رخنمون سنگی یا با بستری با سرعت موج برشی بالا استفاده شده است. در این راستا شکل‌های (6) و (7) به ترتیب نمایش بزرگ‌گام زلزله با فاصله از منبع تولید موج، تقسیم‌بندی حرکات زلزله‌ها بر اساس بزرگ‌گام لرزه‌ای آنها را نشان می‌دهد.



شکل (6): نمایش بزرگ‌گام زلزله به همراه فاصله از منبع تولید آن



شکل (7): تقسیم‌بندی حرکات زلزله‌ها بر اساس بزرگ‌گام لرزه‌ای

جدول (3): نمونه‌ای از 400 رکورد استفاده شده برای تحلیل‌های عددی

مدت زمان قابل توجه (ثانیه)	SED (Cm <sup>2</sup> /S)	a <sub>max</sub> (g)	V <sub>s</sub> (m/s)	R (Km)	M <sub>w</sub>	نام ایستگاه / تعداد رکورد	زلزله
3/710	6/071	0/112	874	11/13	5/28	Golden Gate Park / 0023	سان فرانسیسکو
4/040	3/228	0/095					
4/50	24/397	0/072	483/3	27/42	5/92	Cachuma Dam Toe / 0135	سانتا باربارا
7/230	10/094	0/034					
29/670	611/434	0/169	659/6	15/19	6/53	Cerro Prieto / 0164	ایمپریال ولی
36/320	1376/667	0/157					
7/030	8839/898	1/226	2016/1	1/81	6/61	Pacoima Dam / 0077	سان فرناندو
7/270	2673/428	1/160					
8/280	171/813	0/151	996/4	23/64	6/69	Vasquez Rocks Park / 1091	نورث‌ریج
7/340	137/051	0/139					
6/735	4148/237	0/718	659/6	5/46	6/80	Karakyr / 0126	گازلی
6/340	5171/407	0/608					
20/260	168/179	0/076	609/0	119/64	6/90	TOT / 1117	کوبه
26/100	144/464	0/075					
3/455	634/897	0/473	1428/0	9/64	6/93	Gilory Array #1 / 0765	لوما پریتا
6/525	332/339	0/411					
16/120	32768/364	0/852	766/8	2/05	7/4	Tabas / 0143	طبس
16/520	13951/732	0/836					
20/230	200/552	0/076	649/3	83/31	7/62	ILA031 / 1325	چی - چی
20/085	104/009	0/057					
69/71	6053/35	0/647	-	109/1	8/8	Concepcion San Pedro	شیلی، سازه‌ی فرا ساحلی مول

#### 4-3- مفهوم انرژی کرنشی

رفتار نرم‌شونده (کاهش مقاومت برشی) در پروفیل خاک شده که کاهش محسوس پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را در پی دارد [11].

امروزه به منظور تحلیل روانگرایی خاک‌ها از سه روش مختلف می‌توان استفاده نمود: روش‌های مبتنی بر تنش، کرنش و انرژی [29]. از این میان، روش انرژی در مقایسه با روش‌های تنش و کرنش دارای مزایا و قابلیت‌های گسترده‌ای می‌باشد که از آن میان می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [30-31]:

1- انرژی یک مقدار اسکالر بوده که با یک عدد مشخص می‌شود.

2- روش انرژی کرنشی، سطح تنش و سطح کرنش و همچنین

انرژی امواج لرزه‌ای، انرژی پتانسیل ذخیره شده در سنگ‌ها بوده که در هنگام وقوع زمین‌لرزه به صورت گرما، کار مکانیکی و نیروهای الاستیک توسط امواج سطحی و حجمی به شکل انرژی کرنشی به سطح زمین می‌رسند [28]. هنگامی که این امواج لرزه‌ای به توده خاک می‌رسند، بخشی از انرژی اعمال شده به خاک با توجه به رفتار غیرخطی آن، جذب شده و این پدیده منجر به میرا شدن امواج می‌گردد. علاوه بر این، در ساختگاه‌ها با قابلیت روانگرایی بخشی از انرژی هنگامی مستهلک می‌شود که وقوع روانگرایی به صورت افزایش فشار آب حفره‌ای نمایان گردد. افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک منجر به ایجاد



$$\tau(z, t) = G * \gamma(z, t) = - \left( \frac{G * \omega u_0}{V_s} \right) \sin \left( \frac{\omega z}{V_s} \right) e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$w_d = \int_0^{2\pi/\omega} \text{Real}[\tau(z, t)] \text{Real} \left[ \frac{\partial \gamma(z, t)}{\partial t} \right] dt = G \omega^3 \left( \frac{u_0}{V_s} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\omega z}{V_s} \right) \times \quad (9)$$

$$\int_0^{2\pi/\omega} \left[ -\frac{1}{2} \sin 2\omega t + 2 \sin^2 \omega t \right] dt$$

$$w_d = 2\pi G \zeta \left( \frac{\omega u_0}{V_s} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\omega z}{V_s} \right) \quad (10)$$

#### 4-4- معرفی پارامتر (SCSE)

در مصالح با تغییر شکل‌های ماندگار، سطح تجمعی بین حلقه‌های هیستریزیس معرف میزان اتلاف انرژی بوده که این انرژی به‌نوبه‌ی خود حاوی خواص بارگذاری، خواص مصالح، دامنه کرنش برشی، تعداد سیکل‌ها و ترکیبی از تأثیر تنش و کرنش است. در ادبیات فنی معمولاً این انرژی را در واحد حجم مصالح ارائه می‌دهند که از نظر ابعادی هم‌بعد با تنش می‌باشد [13-14]. از این رو به جهت برآورد نقش انرژی کرنشی در تغییرات الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح پروفیل خاک با استفاده از روابط ریاضی و با انتگرال‌گیری ساده از زمان لرزش و عمق، پارامتر جدید وابسته به انرژی کرنشی (SCSE) که تابعی از تنش و کرنش برشی، مدت زمان مؤثر زلزله و عمق لایه روانگرا می‌باشند، پیشنهاد شده است. به‌عنوان نمونه و برای یک زلزله، پارامتر جدید وابسته به انرژی کرنشی پس از انجام تحلیل‌های عددی از طریق روابط ریاضی به‌صورت مراحل زیر معرفی شده است:

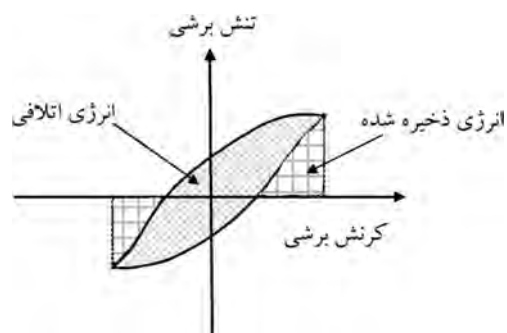
- (الف): استخراج حلقه تنش-کرنش (هیستریزیس) ناشی از امواج لرزه‌ای به ازای هر یک متر عمق از پروفیل خاک، شکل (9).
- (ب): تعیین انرژی کرنشی به‌دست آمده ناشی از محاسبه مساحت حلقه هیستریزیس به کمک انتگرال‌گیری ساده از تمامی حلقه‌های تشکیل یافته بر مبنای روابط ارائه شده در بخش 4-3.
- (ت): تعیین مقدار حداکثر انرژی کرنشی تجمعی نسبت به زمان، شکل (10)، یا به عبارتی تجمیع مساحت تمامی حلقه‌های هیستریزیس نسبت به زمان.

خواص مصالح را در خود دارد [31].

3- روش انرژی مستقل از نوع بارگذاری و مسیر تنش بوده و در مقابل به فشار مؤثر همه‌جانبه، دانسیته خاک و دامنه کرنش برشی بستگی داشته و همچنین قابلیت ارتباط با پارامترهای مربوط به انرژی آزاد شده زلزله واقعی را نیز دارا می‌باشد [30]. راه‌حل نظری معادله موج با رفتار ارتجاعی یک‌بعدی از معادلات جابه‌جایی زمین، تنش و کرنش برشی برای عمق مشخصی از  $Z$  به ترتیب توسط معادله‌های (6) تا (8) به‌دست می‌آید [16] که در این روابط  $U$  جابه‌جایی افقی،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $V_s$  سرعت موج برشی،  $U_0$  حداکثر جابه‌جایی در سطح زمین و  $t$  زمان موج می‌باشد. به‌علاوه  $G^*$  مدول برشی مختلط بوده و برابر  $G(1+2i\zeta)$  است که در آن  $\zeta$  نسبت میرایی بحرانی و  $G$  مدول برشی خاک در کرنش‌های کوچک می‌باشد. شکل (8) نمای شماتیکی از یک حلقه هیستریزیس در صفحه تنش-کرنش را نشان می‌دهد. بر اساس معادلات ارائه شده در زیر، انرژی کرنشی تلف شده مطابق این شکل برای یک سیکل بارگذاری دینامیکی از انتگرال‌گیری حلقه تنش-کرنش در مدت یک پرورد بر طبق رابطه (9) محاسبه می‌شود. قابل ذکر است که مقدار انرژی کرنشی تلف شده برای یک سیکل بعد از انتگرال‌گیری مطابق رابطه (10) به دست می‌آید.

$$u(z, t) = u_0 \cos \left( \frac{\omega z}{V_s} \right) e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = - \left( \frac{\omega u_0}{V_s} \right) \sin \left( \frac{\omega z}{V_s} \right) e^{i\omega t} \quad (7)$$



شکل (8): نمای شماتیک یک حلقه هیستریزیس در صفحه تنش-کرنش

پارامتر ذکر شده توسط انتگرال گیری دو گانه تابعی است که با تنش، کرنش برشی، عمق لایه روانگرا و مدت زلزله رابطه دارد که در رابطه (11) به صورت انتگرال دو گانه از پارامترهای مذکور ارائه شده است. در آن  $CSE$  انرژی کرنشی تجمعی ناشی از سطح حلقه تنش کرنش  $(w_d)$ ،  $t$  زمان مؤثر زلزله‌ها و  $D$  عمق لایه روانگرا می‌باشد:

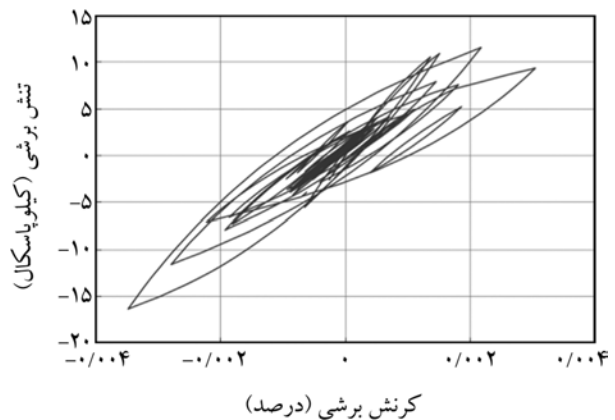
$$SCSE(Specific\ Cumulative\ Strain\ Energy)= \iint [(CSE)_{t,D}] dt dD \quad (11)$$

### 5- بزرگنمایی‌های طیفی

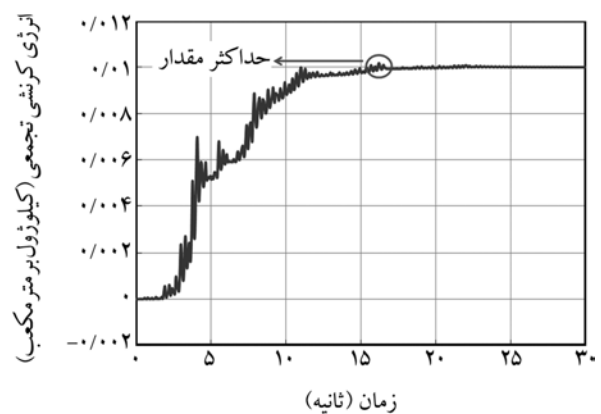
بزرگنمایی طیفی زلزله، حاصل بی‌بعدسازی پاسخ‌های طیفی به دست آمده در سطح زمین ( $Sa_{ground}$ ) نسبت به سنگ بستر لرزه‌ای ( $Sa_{rock}$ ) بوده و نشان‌دهنده‌ی الگویی برای بیان پدیده‌ی تشدید در زلزله‌ها می‌باشد. مطابق توصیه‌ی آیین‌نامه‌ی آشتو 2012 [32] هنگامی که اثرات روانگرایی بر پاسخ ساختگاه مورد نظر باشد، نیاز است که تحلیل‌ها بر مبنای دو روش انجام گیرند. روش اول فرض بر این است که با استفاده از طیف پاسخ سطح زمین و شتاب لرزه‌ای اعمالی، در حالت غیر روانگرا انجام گیرد و در روش دوم تحلیل پاسخ زمین بایستی با فرض وجود روانگرایی خاک انجام پذیرد. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از روش اول (بدون لحاظ اثرات فشار آب حفره‌ای) نتایج محافظه‌کارانه‌ای برای ساختگاه‌هایی با پیوندهای کمتر از یک ثانیه ایجاد می‌کند [5]. از سوی دیگر یاد و کارتر [5] پیشنهاد کردند که در پیوندهای بیشتر از یک ثانیه، ممکن است روانگرایی بر شتاب‌های بالاتر از آن چه که برای موارد غیر روانگرا رخ می‌دهد نیز اثرگذار باشد. لذا به منظور دستیابی به اثرات فشار آب حفره‌ای بر پاسخ سطح زمین، مطابق رابطه (12) با ملاحظه‌ی پتانسیل روانگرایی خاک بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و ارتباط با محدوده پیوندیک تحت تأثیر آن، از پارامتر مشخص  $RSR$  برای نسبت طیف‌های پاسخ استفاده شده است:

$$RSR(T) = S_a^{eff}(T) / S_a^{tot}(T) \quad (12)$$

که در این رابطه  $S_a^{eff}$  مقادیر پاسخ حاصل از تحلیل غیرخطی مبتنی



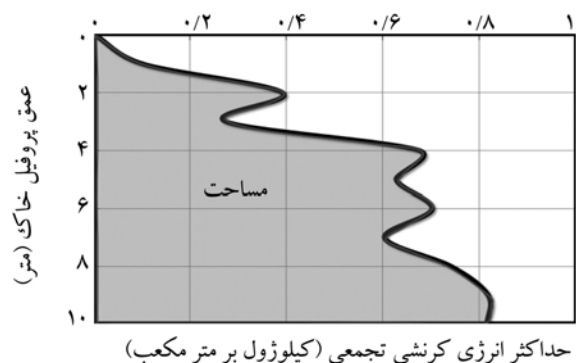
شکل (9): انرژی جذب‌شده و برگشت‌پذیر در صفحه تنش کرنش



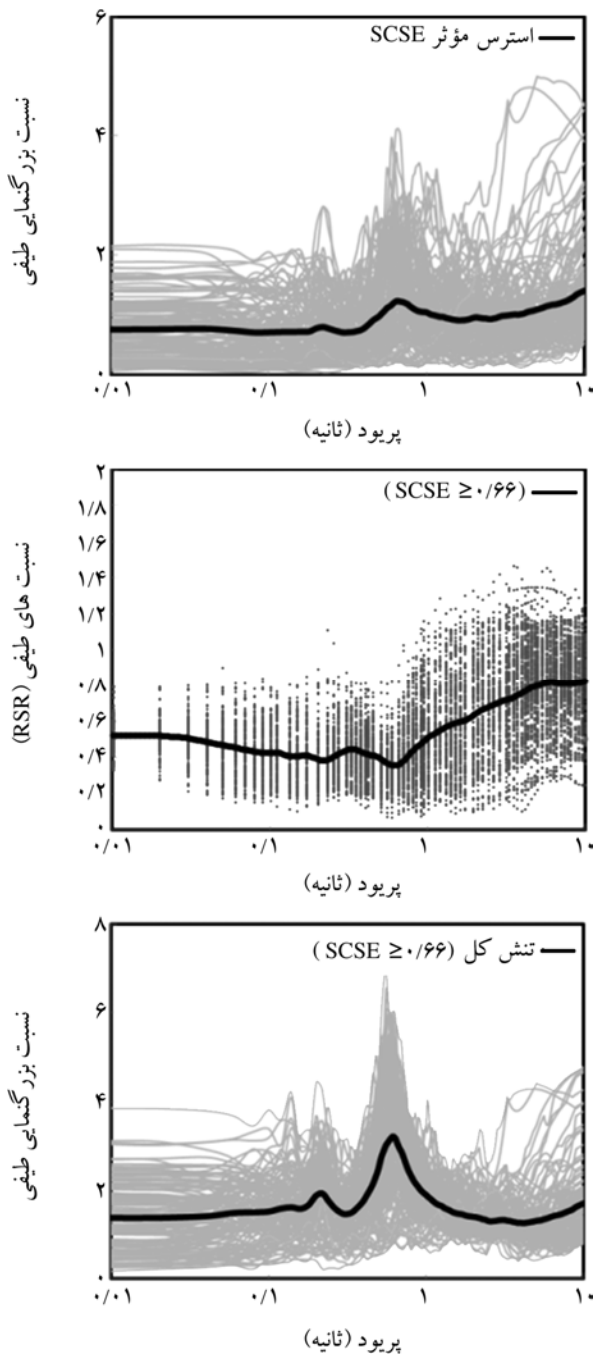
شکل (10): منحنی انرژی کرنشی تجمعی نسبت به زمان

(ث): قرار دادن مقادیر حداکثر انرژی کرنشی تجمعی حاصل از اعماق مختلف در برابر عمق 10 متری لایه روانگرا جهت تأثیر ضخامت لایه تولیدکننده اضافه فشار آب حفره‌ای، شکل (11).

(ج): انتگرال گیری مقادیر حداکثر انرژی کرنشی تجمعی نسبت به عمق لایه روانگرا و معرفی پارامتر Specific Cumulative Strain Energy با محاسبه مساحت زیر سطح نمودار، شکل (11).



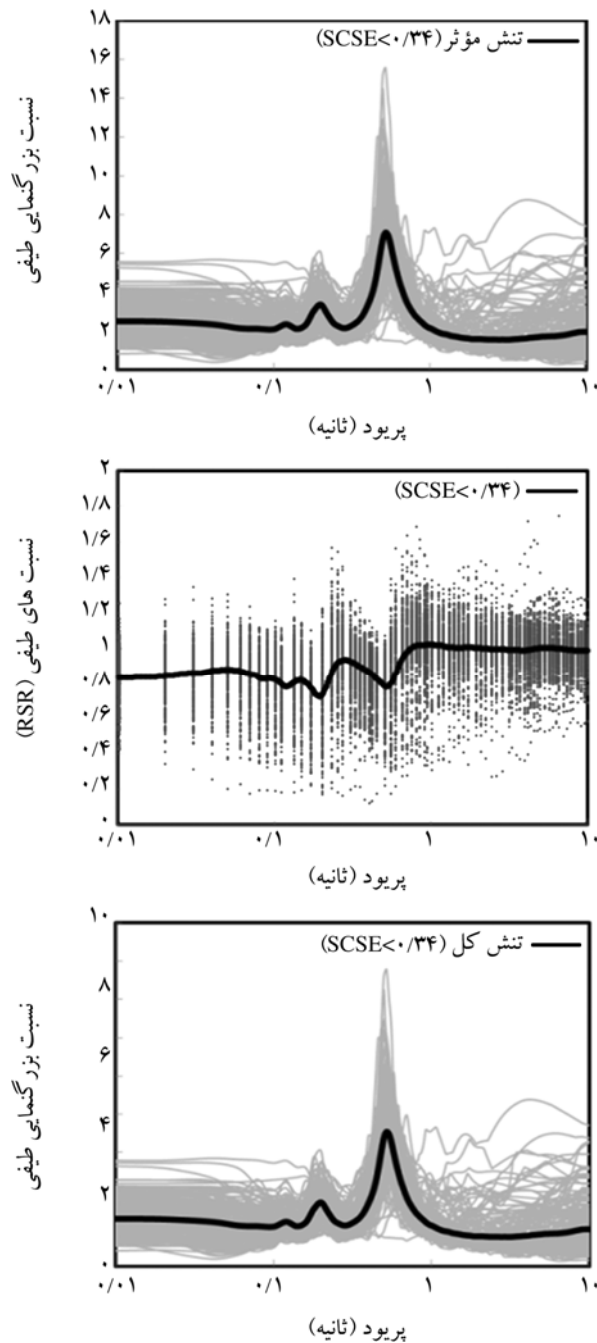
شکل (11): حداکثر انرژی کرنشی تجمعی نسبت به عمق



شکل (12): میانگین الگوهای بزرگنمایی و نسبت طیف‌های پاسخ در دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در محدوده مقادیر بالا ( $SCSE \geq 0/66$ )

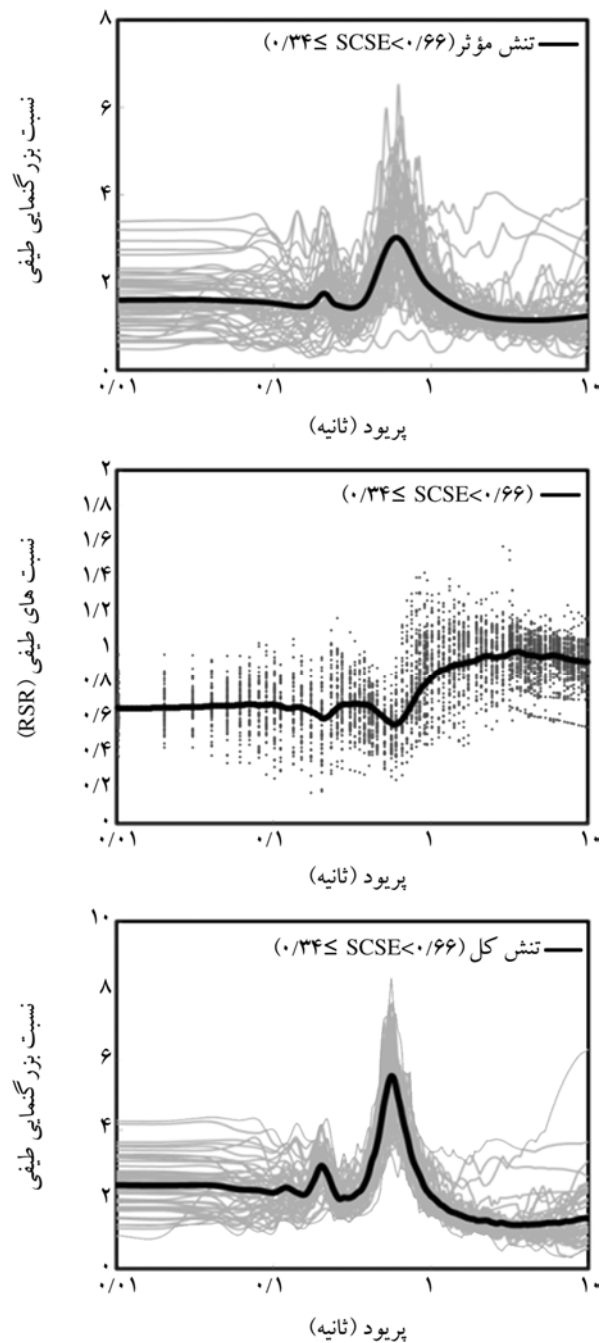
مؤثر در محدوده‌ی مقادیر  $SCSE$  متوسط و ضعیف نشان داده شده است. در زلزله‌هایی که مقدار  $SCSE$  در محدوده‌ی متوسط ( $0/34 \leq SCSE < 0/66$ ) و ضعیف ( $SCSE < 0/34$ ) قرار دارند، میانگین سطوح بزرگنمایی به ترتیب به حداکثر مقدار خود رسیده به گونه‌ای که لایه ماسه‌ای نقش تشدیدکننده امواج لرزه‌ای

بر تنش مؤثر و  $S_a^{tot}$  مقادیر پاسخ به دست آمده از تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش کل می‌باشد. در این تحقیق جهت کاربردی‌تر نمودن و دست‌یابی به نتایج صحیح با انجام آنالیزهای حساسیت، مرزهای تفکیک‌کننده زلزله‌های اعمالی ناشی از دسته‌بندی سطوح قوی ( $SCSE \geq 0/66$ )، متوسط ( $0/34 \leq SCSE < 0/66$ ) و ضعیف ( $SCSE < 0/34$ ) برای پارامتر وابسته به انرژی کرنشی تجمعی در نظر گرفته شده‌اند. شکل (12) میانگین الگوهای بزرگنمایی طیفی تمامی زلزله‌ها در دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر به همراه منحنی میانگین نسبت‌های طیفی، رابطه (12)، را برای محدوده مقادیر بالای  $SCSE$  ( $SCSE \geq 0/66$ ) نشان می‌دهد. مطابق نمودارهای یاد شده، واضح است که سطوح بالای انرژی کرنشی تجمعی به دست آمده موجب کاهش مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای در سطح زمین به خصوص در تحلیل تنش مؤثر شده است. زیرا با افزایش میزان انرژی کرنشی جذب شده توسط خاک، لایه خاک روانگرا شده نقش کوچک‌نمایی و کاهنده‌ی امواج لرزه‌ای را به خصوص در پیرودهای پایین ایفا می‌کند. به عبارتی، مقادیر انرژی کرنشی ناشی از تحریک بالای زلزله و نیز افزایش درجه غیرخطی رفتار خاک در کرنش‌های بالا، موجب این تغییرات می‌شود. علاوه بر این وجود اضافه فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی خاک که از تحلیل تنش مؤثر حاصل می‌شود، بر خلاف تحلیل مبتنی بر روش تنش کل، موجب کاهش بیشتر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین خواهد شد. لازم به توضیح است که در تحلیل تنش کل به علت عدم لحاظ اثرات تغییرات فشار آب حفره‌ای، در کلیه محدوده‌های پیرودی یک بزرگنمایی بیشتری وجود داشته که با واقعیت رفتار خاک در تناقض است. از سوی دیگر مقادیر منحنی میانگین نسبت‌های طیفی ( $RSR$ ) برای حالت  $SCSE \geq 0/66$ ، در تمامی محدوده‌های پیرودی یک زیر عدد 1 (مرز بزرگنمایی) می‌باشد که کاهش مقادیر طیف‌های پاسخ تحلیل تنش مؤثر (با در نظرگیری اضافه فشار آب حفره‌ای) و پررنگ شدن تأثیر آن نسبت به تحلیل تنش کل (بدون لحاظ اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای) را نشان می‌دهد. به همین ترتیب در شکل‌های (13) و (14) میانگین الگوهای بزرگنمایی و نسبت طیف‌های پاسخ در دو تحلیل تنش کل و تنش



شکل (14): میانگین الگوهای بزرگنمایی و نسبت طیف‌های پاسخ در دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در محدوده‌های ضعیف ( $SCSE < 0/34$ )

رفتار غیرخطی خاک اثر غالبی بر مقادیر بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین‌های نرم مستعد روانگرایی نداشته باشد. از این رو در مقادیر منحنی میانگین نسبت‌های طیفی ( $RSR$ ) محدوده تغییرات  $Sa_{(effective)}/Sa_{(total)}$  تقریباً از  $0/75$  (پریود پایین) تا  $1/1$  (پریود بالا) بوده که این نتیجه تطابق تقریبی دو تحلیل تنش مؤثر



شکل (13): میانگین الگوهای بزرگنمایی و نسبت طیف‌های پاسخ در دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در محدوده‌ی مقادیر متوسط ( $0/66 < SCSE <= 0/34$ )

ورودی را ایفا کرده و گویی بر شدت زلزله افزوده شده است. به عبارت دیگر با خفیف بودن قدرت زلزله‌ها (کنش‌های کم تا متوسط)، افزایش فشار آب حفره‌ای به اندازه‌ای نبوده است که بر مقادیر بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین تأثیر گذار باشد. به بیان دیگر، شدت زلزله در این تحلیل‌ها موجب شده است تا

عمق بیشتری از پروفیل خاک نرم، موجب کاهش پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌شوند.

4- با افزایش بزرگای زلزله، پاسخ سطح زمین به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد به طوری که پاسخ‌های به دست آمده در حوزه زمان با توجه به افزایش درجه غیرخطی بودن خاک، دارای کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌باشد.

5- در منحنی مقادیر میانگین نسبت‌های طیفی برای زلزله‌هایی با محدوده‌ی نرخ انرژی کرنشی ضعیف و متوسط، محدوده‌ی تغییرات  $Sa_{(eff)}/Sa_{(tot)}$  تقریباً از 0/8 (پریود پایین) تا 1/1 (پریود بالا) بوده که این امر تشابه تقریبی مقادیر تحلیل‌های تنش مؤثر و تنش کل را به خصوص در محدوده‌ی مقادیر ضعیف مبین می‌سازد.

6- مقادیر منحنی میانگین نسبت‌های طیفی برای حالت انرژی کرنشی بالا، در تمامی محدوده‌های پریودیک زیر عدد یک (مرز بزرگنمایی) می‌باشد که پایین تر بودن مقادیر طیف‌های پاسخ تحلیل تنش مؤثر (با در نظرگیری فشار آب حفره‌ای) نسبت به تحلیل تنش کل (بدون لحاظ فشار آب حفره‌ای) را نشان داده و دلیل بروز این موضوع، جذب سطح بالای انرژی کرنشی تجمعی توسط خاک در تحلیل تنش مؤثر می‌باشد.

نکته قابل توجه اینکه، رفتار غیرخطی خاک در طی یک رویداد لرزه‌ای نقش غالب در تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌های موجود دارد. استفاده از روش غیرخطی در حوزه‌ی زمان در صورت وجود اطلاعات کافی از خصوصیات دینامیکی ساختگاه، تخمین نسبتاً دقیقی از پاسخ خاک در اثر تحریک زلزله دارد. در این روش با استفاده از فرموله نمودن تنش‌های مؤثر، برآورد کرنش‌های ماندگار، امکان مدل کردن نحوه تولید، توزیع و چگونگی زایل شدن فشار آب حفره‌ای در خلال زلزله‌ها (به خصوص برای زلزله‌های قوی) و خاک‌های نرم از مهم‌ترین امتیازات مدل‌های غیرخطی نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. از سوی دیگر با توسعه و پیشرفت روش‌های عددی، استفاده از روش انرژی در ارزیابی اضافه فشار آب حفره‌ای و همچنین تغییر شکل‌های ناشی از آن مقبولیت زیادی یافته است؛ به طوری که در کارگاه NCCER در

و تنش کل را به خصوص در مقادیر ضعیف تر مبین می‌سازد. به عبارت دیگر میزان جذب انرژی به اندازه‌ای است که با کاهش اثر غیرخطی خاک در حلقه‌های هیستریزیس، بزرگنمایی امواج را در هر دو حالت متوسط و ضعیف ایجاد نموده است. این نتیجه در هر دو تحلیل تنش مؤثر و تنش کل قابل مشاهده می‌باشد زیرا در زلزله‌ها با سطوح لرزه‌ای پایین، اضافه فشار آب حفره‌ای کمتری ایجاد شده است به همین دلیل در نتایج تنش کل و مؤثر تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود.

## 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تحلیل نقش تغییرات انرژی کرنشی و فشار آب حفره‌ای در الگوی بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین‌های نرم مستعد روانگرایی تحت اعمال طیف گسترده‌ای از زلزله‌ها بر اساس روش غیرخطی مبتنی بر دو تحلیل تنش کل و تنش مؤثر در فضای زمان پرداخته شده است. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده الگوهای بزرگنمایی پاسخ سطح زمین در محدوده‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و همچنین اثر مدت‌زمان مؤثر زلزله‌ها و ضخامت لایه‌ای که در آن روانگرایی رخ می‌دهد مد نظر قرار داده شده است. نتایج به دست آمده را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی نمود:

1- در روش تنش مؤثر در حوزه زمان می‌توان نمودار پیش‌بینی طیف‌های پاسخ سطح زمین و تغییرات افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای را در خلال و پس از زلزله مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی عددی اضافه فشار آب حفره‌ای و پاسخ‌های زمین در نرم‌افزار CYCLICID مطابقت مطلوبی با نتایج حاصل از آزمایش سانتریفیوژ شماره 1 پروژه ولکس داشته است.

2- در زلزله‌های ضعیف‌تر (بزرگای کمتر) می‌توان با وجود استعداد روانگرایی پروفیل خاک به تحلیل تنش کل پاسخ زمین اکتفا نمود. اما در زلزله‌های قوی‌تر انجام تحلیل تنش مؤثر به نظر الزامی است.

3- زلزله‌های قوی (زلزله‌هایی با بزرگای بالا) با فعال کردن فشار آب حفره‌ای و به دنبال آن افزایش انرژی کرنشی تجمعی در

- Engineering*, ASCE, **131**(7), 811-825.
6. Zhao, J.X. and Zhang, J. (2010) Side-effect of using response spectral amplification ratios for soft soil sites-earthquake source-type dependent amplification ratios. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **30**, 258-269.
  7. Kramer, S.L. Hartvigsen, A.J., Sideras, S.S., and Ozener, P.L. (2011) Site response modeling in liquefiable soil; Deposits. *4<sup>th</sup> IASPEI/IAEE International Symposium, University of California, Santa Barbara*, August 23 - 26, 2011.
  8. Zheng, W. and Luna, R. (2011) Nonlinear site response and liquefaction analysis in the new Madrid seismic zone. *Geotechnical and Geological Engineering*, **28**, 463-475.
  9. Su, D., Ming, H.Y., and Li, X.S. (2013) Effect of shaking strength on the seismic response of liquefiable level ground. *Engineering Geology*, **166**, 262-271.
  10. Groholski, D.R., Hashash, Y.M.H., and Matasovic, N. (2014) Learning of pore pressure response and dynamic soil behavior from downhole array measurements. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **61-62**, 40-56.
  11. Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M., and Koohsari, H. (2015) Comparison of equivalent linear and nonlinear methods in seismic analysis of liquefiable site response due to near-fault incident waves: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**(8), 3103-3118.
  12. Nemat-Nasser, S. and Shokooh, A. (1979) A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing. *Canadian Geotechnical Journal*, **16**, 659-678.
  13. Green, R.A. (2001) *Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*. Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
  14. Green, R.A., Mitchell, J.K., and Polito, C.P. (2000). An energy-based excess pore pressure generation model for cohesionless soils.

سال 2001 همه محققین و شرکت کنندگان بر توسعه‌ی تحقیقات در زمینه‌ی روانگرایی از طریق روش‌های مبتنی بر انرژی متفق القول بودند [33]. در مقایسه با روش‌های ارائه‌شده بر اساس تنش و کرنش، دستورالعمل انرژی بینش و فهم مناسب‌تری از سازوکار پدیده روانگرایی فراهم می‌آورد. زیرا روش انرژی، سطح تنش و سطح کرنش و همچنین خواص مصالح را در خود دارد و از طرف دیگر قابلیت ارتباط با پارامترهای مربوط به انرژی آزاد شده زلزله‌ی واقعی را نیز دارا می‌باشد. اما به دلیل آن که این روش نسبتاً جدید می‌باشد، برای تأیید صحت و اعتبار آن به مدارک متقاعدکننده‌ی بیشتری نیاز است. در نهایت از آنجایی که مدل ایجاد شده در این تحقیق به اعتبارسنجی پروژه‌ی شماره یک ساترفیوژ ولکس مرتبط می‌باشد، از این رو تمامی محدودیت‌های آن از قبیل محدود بودن عمق، مختص بودن به ماسه نواد، تراکم نسبی خاک و در نهایت صلب بودن سنگ بستر را به همراه دارد و نتایج حاصل در چارچوب فرضیات این تحقیق دارای اعتبار است.

## مراجع

1. Hashash, Y.M.A, Grohalski, D.R, and Philips, C.A. (2010) Recent advances in non-linear site response analysis. *5<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California.
2. Zeghal, M. and Elgamal, A.W. (1994) Analysis of site liquefaction using earthquake records. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(6), 996-1017.
3. Yang, J., Sato, T., Savidis, S., and Li, X.S. (2002) Horizontal and vertical components of earthquake ground motions at liquefiable site. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **22**, 229-240.
4. Yang, J., Sato, T., and Li, X.S. (2000) Nonlinear site effects on strong ground motion at a reclaimed island. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 26-39.
5. Youd, T.L. and Carter, B.L. (2005) Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

24. Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Paul, D.K., and Shiomi, T. (1990) Static and dynamic behavior of soils: a rational approach to quantitative solutions: I. fully saturated problems. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **429**, 285-309.
25. Yang, Z., Elgamal, A., Adalier, K., and Sharp, M.K. (2004) Earth dam on liquefiable foundation and remediation: numerical simulation of centrifuge experiments. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(10), 1168-1176
26. Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M., and Fruth, L.S. (1992) *Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies Laboratory Testing Program Soil Data*. Report: The Earth Technology Corporation.
27. Taboda, V.M. (1995) *Centrifuge Modeling of Earthquake Induced Lateral Spreading in Sand Using a Laminar Box*. A thesis Submitted to the Graduate Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Troy, New York.
28. Trifunac, M.D. and Todorovska, M.I. (2013) A note on energy of strong ground motion during Northridge, California, earthquake of January 17, 1994. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **47**, 175-184.
29. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey, 672p.
30. Liang, L., Figueroa, J.L. and Saada, A.S. (1995) Liquefaction under random loading: a unit energy approach. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **121**(GT11), 776-810.
31. Law, K.T., Cao, Y.L., and He, G.N. (1990) An energy approach for assessing seismic liquefaction potential. *Can. Geotech. J.*, **27**, 320-329.
32. AASHTO (2012) LRFD Bridge Design Specifications, Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials.
33. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, *Proceedings: Developments in Theoretical Geomechanics- the John Booker Memorial Symposium* (D.W. Smith and J.P. Carter, eds.), Sydney, New South Wales, Australia, Nov. 16-17, AA. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 383-390.
15. Baziar, M.H. and Jafarian, Y. (2007) Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and Ann model; capacity energy. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **27**, 1056-1072.
16. Jafarian, Y., Sadeghi, A., Vakili, R., Baziar, M.H., and Noorzad, A. (2011) On the efficiency and predictability of strain energy for the evaluation of liquefaction potential: A numerical study. *Computers and Geotechnics*, 800-808.
17. Kokusho, T. (2013) Liquefaction potential evaluations: energy-based method versus stress-based method. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**.
18. Chen, Y.R., Chen, J.W., Hsieh, S.C., and Chang, Y.T. (2014) Evaluation of soil liquefaction potential based on the nonlinear energy dissipation principles. *Journal of Earthquake Engineering*, **17**(1), 54-72.
19. Elgamal, A.W., Yang, Z., and Parra, E. (2002) Computational modeling of cyclic mobility and post liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(4), 259-271.
20. Iwan, W.D. (1965) On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems. *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, 613-617
21. Mroz, Z. (1967) On the description of anisotropic work hardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **15**, 163-175.
22. Biot, M.A. (1962) The mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *J. Appl. Phys.*, **33**(4), 1482-1498.
23. Chan, A.H.C. (1988) *A Unified Finite Element Solution to Static and Dynamic Problems in Geomechanics*. Ph.D. Dissertation, Univ. College of Swansea, Swansea, U.K.

W.D.L., Harder, Jr., L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, II, K.H. (2001) Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(10), 817-833.

### اصطلاحات فنی

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| Site Effects                                   | 1- اثرات ساختگاه                 |
| SCSE   | 2- پارامتر وابسته به انرژی کرنشی |
| Kinematic Hardening                            | 3- سخت‌شوندگی جنبشی              |
| Contractive Behavior                           | 4- رفتار انقباضی خاک             |
| Body Forces                                    | 5- نیروهای حجمی                  |
| Pacific Earthquake Engineering Research Center | 6- PEER                          |



## Numerical Modeling of Seismic Site Response of Liquefiable Soils Based on Cumulative Strain Energy

Hamid Alielahi<sup>\*1</sup>, Mohammad Adampira<sup>2</sup>, Mohammad Ghabraei<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Iran.  
Corresponding Author, e-mail: h.alielahi@iauz.ac.ir

2. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad Univ., Tehran, Iran

3. M.Sc., Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

### Introduction

Liquefaction phenomena may cause two major concerns: 1- Ground deformation or ground failure due to the excess pore water pressure, and 2- Changing in ground site response caused by softening of liquefiable soil [1]. Liquefaction assessment and its consequences have been investigated by many researchers [2]. Although, there are not enough studies to determine the effect of soil softening and liquefaction on the seismic ground response. The main purpose of this study is to evaluate the ground response for liquefiable sites. Hence, Specific Cumulative Strain Energy (SCSE) parameter is defined to consider the effects of earthquake duration and thickness of liquefiable layer. The results of amplification pattern were presented in both of the effective and total stress analyses.

### Numerical modeling

Numerical prediction of the liquefiable soil response requires a nonlinear, effective stress analysis with a relatively sophisticated constitutive model. In order to use compatible constitutive model in numerical analysis, multi-yield surfaces models applied in CYCLIC1D software [3]. The centrifuge model of VELACS project (model number 1) is examined for the verification of numerical modeling, Figure (1). Note that, this program models the nonlinear, inelastic behavior of soils and can represent phase transformation behavior of the potentially liquefiable soils.

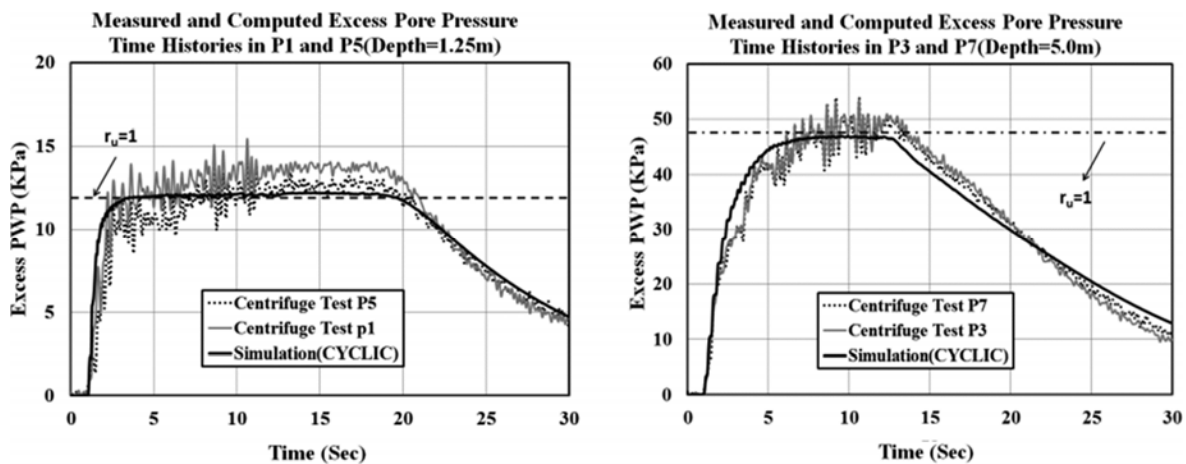


Figure 1. Comparison of predicted and measured pore water pressures at points P5–P7 from VELACS centrifuge tests No.1.

### Results and Discussion

The cumulative enclosed area of the earthquake-induced shear stress–strain loops is referred to as dissipated strain energy density (or unit energy). Cumulative strain energy is an internal response of soil body to the external loading, and thus, it can be employed as a useful measure for the analysis of soil behavior. Hence, Specific Cumulative Strain Energy (SCSE) parameter was defined to consider the effects of earthquake duration and thickness of liquefiable layer.

In order to study the effect of excess pore pressure and strong motion characteristics on the seismic response of ground surface, the following equation was presented:

$$RSR(T) = S_a^{eff}(T) / S_a^{tot}(T) \quad (1)$$

where,  $S_a^{eff}$  and  $S_a^{tot}$  are the response of effective and total analyses, and RSR is response spectra ratio, respectively. The earthquakes were classified as strong ( $SCSE \geq 0.66$ ), moderate ( $0.34 \leq SCSE < 0.66$ ), and weak ( $SCSE < 0.34$ ) motions in this study. The response spectra ratio ( $RSR$ ) of these different ground motions (strong, moderate and weak motion) were depicted in Figure (2).

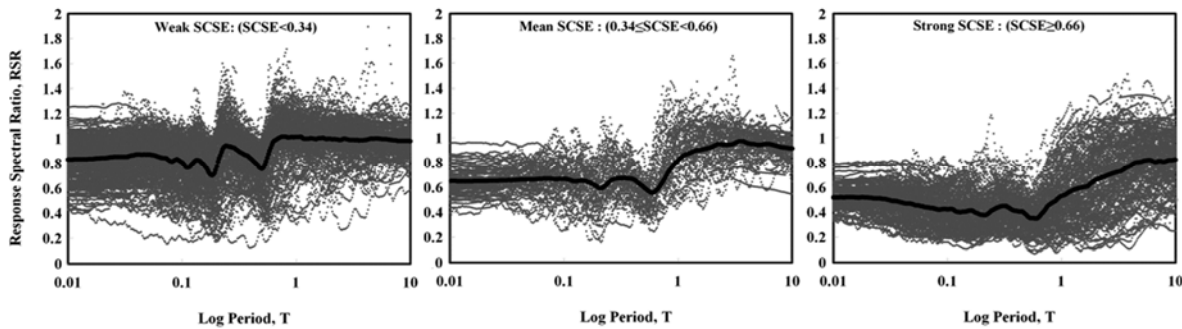


Figure 2. RSR of total and effective stress analysis of these different ground motions (strong, moderate and weak motion)

### Summary and Conclusion

In this paper, the effects of strain energy and excess pore pressure on the seismic response amplification of liquefiable soil were studied based on the effective and total stress nonlinear analyses approaches. The main important conclusions drawn from present study are as follows:

1. Regarding the liquefaction potential throughout the soil profile, the results of total and effective stress analyses are in compliance with each other for weak ground motions. However, for stronger motions, effective stress analyses method is essentially recommended.
2. Strong ground motions that generated the excess pore water pressure and consequent increasing of the cumulative strain energy in depth of soil, reduce ground response spectra.
3. The value of RSR for earthquake with weak and mediocre strain energy variety from 0.8 to 1.1, that indicate the similarity of effective and total stress methods results for weak and mediocre strain energies.
4. The average values of spectra ratio ( $RSR$ ) for high strain energy for all periods of input ground motions are lower than one. In other words, by growing strain energy, the soil nonlinear behavior and absorption of strain energy increases. Thus, the response that calculated by effective stress method ( $S_a^{eff}$ ) reduces compared to the result of the total stress method ( $S_a^{tot}$ ).

### References

1. Youd, T.L. and Carter, B.L. (2005) Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration. *ASCE*

*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(7).

2. Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M., and Koohsari, H. (2015) Comparison of equivalent linear and nonlinear methods in seismic analysis of liquefiable site response due to near-fault incident waves: a case study. *Arab J. Geosci*, **15** (8), 3103-3118.
3. Elgamal, A.W., Yang, Z., and Parra, E. (2002) Computational modeling of cyclic mobility and post liquefaction site response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(4), 259-271.

**Keywords:** Site Effects; Cumulative Strain Energy; Pore Water Pressure; Amplification Pattern; Liquefaction; Nonlinear Analysis.