

مدل سازی فیزیکی و شبیه سازی عددی پاسخ لرزه‌یی ساختگاه متشکل از زیرلایه‌ی روانگراشونده

محمد آدم پیراء (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

عباس قلندرزاده (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهدی درخشندی* (استادیار)

حسین جواهری کوبانی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۳/۱، ص. ۸۳-۷۱

علی‌رغم تأثیر خاک‌های نرم با قابلیت روانگرایی در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین، در حال حاضر به دلیل پیچیدگی‌های مرتبط با مسئله‌ی مطرح شده، شناخت جامعی از آن در ادبیات فنی وجود ندارد. در پژوهش حاضر، رفتار لرزه‌یی لایه‌های خاک با قابلیت روانگرایی و تأثیر آن‌ها در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین ارزیابی شده است. از این رو، با تکیه بر اصول مدل سازی فیزیکی و بهره‌مندی از آزمایش میز لرزه، الگوی اولیه‌ی پاسخ لرزه‌یی در پروفیل خاک مورد نظر استخراج و در ادامه، در قالب مدل سازی عددی مبتنی بر تحلیل تنش مؤثر یک بعدی به بررسی مسئله پرداخته شده است. در نهایت، الگوهای بزرگ‌نمایی لرزه‌یی پردازش و نقش زیرلایه‌های مستعد روانگرایی در تعدیل و یا تشدید پاسخ لرزه‌یی سطح زمین بررسی شده است. به‌طور کلی، مطالعات آزمایشگاهی و عددی پژوهش حاضر نشان داده‌اند که روانگرایی لایه‌های زیرین به‌طور مؤثر قابلیت تعدیل شدت امواج لرزه‌یی و مهار نیروی ناشی از زلزله را خواهد داشت.

واژگان کلیدی: زیرلایه‌های روانگراشونده، آزمایش میز لرزه، مدل سازی عددی غیرخطی، اثر ساختگاه.

m.adampira@srbiau.ac.ir
aghaland@ut.ac.ir
m-derakhshandi@srbiau.ac.ir
h-javaheri@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

تقریباً در اغلب ویرایش‌های جدید آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های لرزه‌یی، به اجتناب از ساخت و ساز بر روی ساختگاه‌های با قابلیت روانگرایی^۱، توصیه‌ی اکید شده است. فقط در حالتی امکان ساخت و ساز فراهم خواهد شد که ساختگاه مورد نظر، دست‌کم در شعاع و عمق مشخصی از محل قرارگیری فونداسیون‌ها، به اندازه‌ی کافی بهسازی شود و یا با استفاده از پی‌های عمیق، بارهای سازه‌یی به لایه‌های خاک عمیق‌تر غیرروانگرا انتقال پیدا کنند. با توجه به رویکرد موجود در آیین‌نامه‌های لرزه‌یی، اساساً پاسخ میدان سطح آزاد و طیف طراحی آن در ساختگاه‌های با قابلیت روانگرایی کمتر توجه شده است و تاکنون پژوهشگرانی که مسائل مختلف پدیده‌ی روانگرایی را مطالعه و بررسی کرده‌اند، فقط یک نگاه کمینه‌یی و گذرا به آن داشته‌اند. این در حالی است که مطالعات محدود انجام شده بر روی داده‌های ساختگاه‌های

واقعی نشان داده‌اند که وجود یک رویه‌ی غیرروانگرا، مقاومت برشی کافی (به‌عنوان مثال رس طبیعی و یا ماسه‌ی متراکم شده توسط ستون‌های سنگی) در بالای لایه‌ی خاک روانگرا دارند، آثار زیان‌بار وقوع روانگرایی را به شدت تعدیل خواهد کرد و شرایطی را به نحوی فراهم می‌کند که معیارهای ایمنی و عملکرد مطلوب پی‌های سطحی برآورده خواهد شد.^[۱-۵] از این رو، برداشت مطرح شده از مطالعات پیشین، پایه‌گذار امکان بهره‌برداری مناسب از پتانسیل موجود در زیرلایه‌های خاک روانگرا شده است؛ به‌طوری که در روش طراحی نوین، بارهای اینرسی وارد بر سازه‌های روستحی می‌تواند به شدت کاهش یابد. براساس دیدگاه ذکر شده، لایه‌های خاک روانگراشده واقع در پایین رویه‌ی غیرروانگرا، همانند یک جداساز لرزه‌یی طبیعی ایفای نقش می‌کند. از این حیث، اخیراً پژوهش و مطالعه بر روی پیش‌بینی پاسخ سطح میدان آزاد ساختگاه‌های روانگرا، جذابیت پژوهشی قابل قبولی داشته و مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

با این حال مطالعات انجام شده در مورد تأثیر لایه‌های روانگرا در پاسخ لرزه‌یی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۹/۱۴

DOI:10.24200/J30.2017.5308.2230

ساختمان و در پی آن عملکرد لرزه‌ی سازه‌های فوقانی، محدود و عمدتاً شامل مطالعات میدانی و به‌ندرت عددی و آزمایشگاهی است. مشاهدات و مطالعات میدانی که سهم قابل توجهی از مطالعات ذکر شده را به خود اختصاص داده‌اند، غالباً محدود به مسائل با ساختگاه‌های واقعی می‌شوند. بدیهی است که در شرایط ساختگاه‌های واقعی به دلیل عدم وجود شرایط مناسب جهت تحلیل داده‌ها که اغلب ناشی از نحوه‌ی ابزاربندی‌هاست، عدم قطعیت‌های موجود به‌طور مشخصی افزایش می‌یابد. از این رو، نتایج قابل اطمینان ارائه شده در مطالعات میدانی بسیار اندک است.^[۶] از جمله مطالعات انجام شده می‌توان به مطالعات گسترده‌ی در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد که در آن حرکات ثبت شده‌ی زمین در ۴ ساختمان با قابلیت روانگرایی بررسی شده است.^[۶] کاهش طیف شتاب در دوره‌های تناوب^۲ کوتاه در اثر افزایش فشار آب حفره‌ی، اثر کمتر نرم‌شدگی^۳ خاک در دوره‌های تناوب کوتاه طیف شتاب در ساختمان‌هایی که روانگرایی پس از اتمام زلزله رخ خواهد داد و همچنین تقویت بزرگ‌نمایی مقادیر طیفی در دوره‌های تناوب بلند در اثر روانگر شدن لایه‌های خاک، از جمله نتایج مهمی است، که در پژوهش مذکور به آن‌ها اشاره شده است.

مدل‌سازی‌های فیزیکی^۴ انجام شده در این زمینه نیز عمدتاً به رفتار لرزه‌ی پروفیل کامل خاک روانگر و آثار تخریبی آن معطوف بوده است. تلاش‌های اولیه در زمینه‌ی اشاره‌شده، تقریباً از ۲۰ سال قبل با پروژه‌ی مطالعاتی ولکس (VELACS)^۵ آغاز شده است.^[۷] و در چند سال اخیر نیز با تکیه بر ابزارهای انجام آزمایش و تجهیزات دقیق ثبت داده‌ها، طی مطالعات متفاوتی ادامه داشته است. به‌طوری که یک مدل‌سازی فیزیکی بر پایه‌ی زلزله‌ی هوگوکن نانبو^۶ (۱۹۹۵) با استفاده از آزمایش میز لرزه^۷ توسط موری و همکاران (۱۹۹۸) به بهانه‌ی ارزیابی رفتار خاک‌های روانگر انجام شده است.^[۸] در آزمایش اخیر، پروفیل مدل شده متشکل از خاک ماسه‌ی اشباع بوده و به‌عنوان نتایج نهایی حرکات افقی ثبت شده در سطح پروفیل در مقادیر ورودی قوی‌تر، دچار تعدیل قابل توجهی شده‌اند که ناشی از وقوع روانگرایی و رفتار غیرخطی خاک است. اخیراً نیز سو و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی یک سری آزمایش‌های سانتیفیوژ^۸ بر روی مدل‌های پروفیل ماسه‌ی اشباع با شرایط اولیه‌ی یکسان به منظور مطالعه‌ی اثر شدت لرزش در رفتار ماسه‌های روانگرشده تحت بارگذاری زلزله پرداخته‌اند. پاسخ‌های خاک، از جمله شتاب، اضافه فشار آب حفره‌ی، نشست قائم و جابه‌جایی افقی در آزمایش‌های مذکور ثبت شده است و در کل، مشاهدات آزمایشگاهی توانسته‌اند اهم آثار شدت لرزش در پتانسیل روانگرایی، تغییر مکان‌های نهشته‌های ماسه‌ی و نسبت بزرگ‌نمایی شتاب‌ها را تأیید کنند.^[۹]

بدیهی است مدل‌سازی‌های عددی در کنار مدل‌سازی‌های فیزیکی، مؤثرترین ابزار جهت مطالعه‌ی اثر لایه‌های خاک مستعد روانگرایی در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین خواهند بود. این در حالی است که تاکنون مطالعات عددی به دلیل پیشرفت روش‌های عددی در مدل‌سازی مسائل دینامیکی، توجه ویژه‌ی به مسئله‌ی اثر ساختگاهی زمین داشته‌اند. با این حال، نتایج مدل‌های عددی یا صحت‌سنجی صحیح نشده‌اند و یا غالباً با مشاهدات میدانی همراه با وجود عدم قطعیت‌های یاد شده اعتبارسنجی شده‌اند. از جمله مطالعات انجام پذیرفته در این زمینه می‌توان به برخی مطالعات در طی سال‌های ۲۰۰۲ الی ۲۰۱۵ اشاره کرد.^[۱۰-۱۷] بدیهی است به منظور در نظر گرفتن اضافه فشار آب حفره‌ی، مدل رفتاری باید توانایی مدل‌سازی رفتار حجمی تحت شرایط بارگذاری تناوبی^۹ را داشته باشد. از این میان، مدل‌های رفتاری^{۱۰} بسیاری توانایی خود را در پیش‌بینی نوسان‌های فشار آب حفره‌ی مشاهده شده‌ی قبل، حین و بعد از شروع روانگرایی نشان

داده‌اند. این مدل‌های رفتاری علاوه بر مدل‌سازی جزئیات مختص به پدیده‌ی روانگرایی، می‌توانند جنبه‌های مهم پاسخ پروفیل خاک روانگر را به خوبی ارائه دهند. همچنین مقایسه‌ی تحلیل‌های عددی با و بدون در نظر گرفتن روانگرایی نشان می‌دهد که بیشتر انرژی زلزله در طی زمان روانگرایی جذب می‌شود و پاسخ لرزه‌ی کمتری به سطح زمین می‌رسد.^[۱۳] به همین ترتیب کرامر و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۸] با نگاهی ویژه به مسئله‌ی روانگرایی و اثر آن در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین، ساختمان وایلدلایف^{۱۱} را بر مبنای روش تنش مؤثر بررسی کرده‌اند.

بررسی ادبیات فنی در حوزه‌ی اشاره شده نشان می‌دهد که تمرکز اصلی پژوهش‌های عددی انجام شده تاکنون، بر چگونگی مدل‌سازی مبتنی بر روش‌های تنش کل و صحت‌سنجی آن با نتایج به‌دست آمده از ساختمان‌های واقعی بوده است. بدیهی است عدم قطعیت موجود در متغیرهای ساختمان واقعی موجب کاهش امکان صحت‌سنجی دقیق مدل‌های عددی می‌شود. از طرف دیگر، در مطالعات پیشین توجه کمتری به پاسخ لرزه‌ی سطح زمین در اثر وجود زیرلایه‌های با قابلیت روانگرایی شده است. از این رو، نویسندگان پژوهش حاضر بر این باورند که بررسی دقیق مسئله‌ی ذکر شده مستلزم انجام مدل‌سازی‌های فیزیکی دقیق در جهت کاهش عدم قطعیت متغیرهاست. از طرف دیگر، انجام مدل‌سازی فیزیکی و عددی این امکان را فراهم می‌آورد تا متغیرهای موجود و حالت‌های مختلف وقوع پدیده‌ی روانگرایی که طبیعتاً وابسته به شرایط هندسی، مصالح و زلزله‌ی اعمالی است، تحت کنترل پژوهشگر باشد. بر این اساس، رابطه‌ی وقوع پدیده‌ی روانگرایی و شتاب‌های لرزه‌ی سطح زمین، که از نتایج تحلیل‌های فیزیکی و عددی استخراج شده باشد، می‌تواند عدم قطعیت‌های موجود در متغیرهای ساختمان واقعی را به‌خوبی پوشش دهد. آنچه که در پژوهش حاضر به‌طور مشخص بررسی شده است، ارزیابی رفتار لرزه‌ی لایه‌های خاک با قابلیت روانگرایی و تأثیر آن‌ها در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی است. از این رو، با تکیه بر اصول مدل‌سازی فیزیکی و بهره‌مندی از آزمایش میز لرزه، الگوی اولیه‌ی پاسخ لرزه‌ی در پروفیل خاک موردنظر استخراج و در ادامه، در قالب مدل‌سازی عددی مبتنی بر تحلیل تنش مؤثر یک بعدی به صحت و بررسی مسئله پرداخته شده است.

۲. مدل‌سازی فیزیکی

در نوشتار حاضر، مجموعه‌ی آزمایش‌های میز لرزه‌ی ۱g به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ی لایه‌های خاک با قابلیت روانگرایی و تأثیر آن‌ها در پاسخ لرزه‌ی سطح پروفیل انجام شده است. در آزمایش‌های انجام شده، اثر زیرلایه‌ی روانگرشده تحت تحریک دو تارخچه‌ی زمان شتاب با دامنه‌های متفاوت به‌عنوان متغیر اصلی بررسی شده است. در این راستا، مشخصات مدل‌های آزمایش میز لرزه به همراه مشخصات مختصر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. به‌صورت خلاصه، آزمایش‌ها به منظور مدل کردن زیرلایه‌ی روانگر از نظر مصالح و تراکم به انواع مختلف تقسیم بندی شده‌اند که عبارت‌اند از: خاک ماسه‌ی غیرروانگر و خاک ماسه‌ی با تراکم کم جهت مدل‌سازی لایه‌ی روانگر و ماسه‌ی رس‌دار با تراکم نسبی جهت مدل‌سازی رویه‌ی غیرروانگر در حالت اشباع.^[۱۹] در شکل ۱، نمای شماتیکی از پروفیل مدل آزمایش مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که براساس نوع مسئله‌ی بیان شده، ذات یک بعدی آن و همچنین روند پژوهش انتخاب شده، هندسه و ابعاد مدل‌های آزمایشگاهی ساخته شده بر پایه‌ی معیارهای

جدول ۱. فهرست مدل‌های آزمایش میز لرزه به همراه مشخصات آن‌ها.

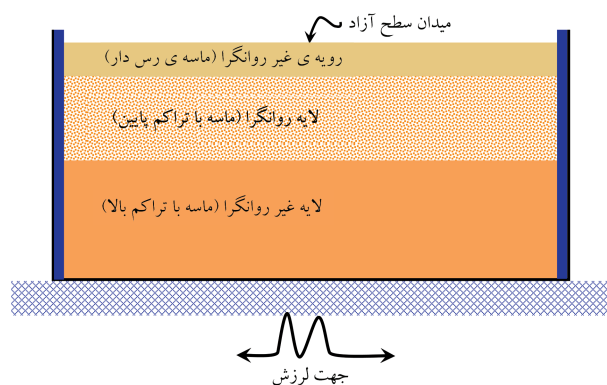
شناسه	نوع مدل	مشخصات لایه‌های پروفیل مدل						مشخصات شتاب محرک مدل			
		ضخامت (متر)			تراکم (درصد)			نوع شتاب	بیشینه‌ی زمان موثر شدت آریاس	شتاب (ثانیه)	شتاب (هرتز)
		لایه‌ی لایه‌ی لایه‌ی	تحتانی	میانی	تحتانی	میانی	فوقانی				
Liq	وقوع روانگرایی	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۰	۹۰	۱۵	۵۰	تاریخچه‌ی زمانی	۱۲/۸۶	۰/۰۲۷	۳/۹
Non-Liq	عدم وقوع روانگرایی	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۰	۹۰	۱۵	۵۰	تاریخچه‌ی زمانی	۱۲/۸۸	۰/۰۶۰۱	۳/۹

ریختن لایه‌ی بعدی، سطح تمام شده‌ی لایه‌ی زیرین به صورت زیگزاگ به جهت ایجاد گیرداری بین لایه‌ها خراشیده و لایه‌ی بعدی به همین ترتیب به روش بارش و کوبش متراکم شد.

برای اندازه‌گیری شتاب ورودی و همچنین شتاب در قسمت‌های مختلف مدل از ۷ شتاب‌سنج^{۱۳} در ترازهای مختلف پروفیل مدل شده استفاده شده است. به طوری که شتاب ورودی توسط شتاب‌سنج ۱ ACC و همچنین شتاب سطح پروفیل توسط شتاب‌سنج ۷ ACC و ۶ ACC ثبت شده‌اند. در همین راستا، از ۵ حسگر فشار آب حفره‌ی (PWP)^{۱۴} به جهت ثبت مقادیر فشار آب حفره‌ی پروفیل خاک در طول زمان لرزش و تا زمانی مشخص بعد از آن استفاده شده است. در شکل ۳، چیدمان و ابزاربندی مدل‌های ساخته‌شده به همراه ابعاد مدل با جزئیات ارائه شده است. لازم به ذکر است که سرعت موج برشی مدل ساخته شده در مطالعه‌ی حاضر، با اندازه‌گیری اختلاف زمانی بین بیشینه‌ی شتاب ثبت شده در دو شتاب‌سنج (۱ ACC و ۶ ACC)، برابر با ۶۵ متر بر ثانیه تخمین زده شده و با توجه به اختلاف موقعیت آن‌ها، مقدار بسامد طبیعی مدل برابر با ۲۵ هرتز پیش‌بینی شده است.

۳. شبیه‌سازی عددی

رفتار مصالح در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری تحت ارتباط بین تنش و کرنش تعریف و مشخص می‌شوند. مدل‌های رفتاری ذکر شده، هسته‌ی اصلی روش‌های عددی را تشکیل می‌دهند. تقریباً تمامی مدل‌های رفتاری برای خاک‌های مستعد روانگرایی بر پایه‌ی حالت خمیری با مدل‌سازی فشار آب حفره‌ی بنا نهاده شده‌اند که این امر با توجه به کرنش‌های برگشت‌ناپذیر در خاک‌های ذکر شده با رفتار واقعی خاک تطابق دارد. به منظور انجام تحلیل‌های غیرخطی در برآورد پاسخ لرزه‌ی زمین به نرم‌افزارهای متعددی نظیر FLAC، DEEPSOIL و D-MOD می‌توان اشاره کرد. در این بین، نرم‌افزار CYCLIC۱D^[۲۳،۲۴] یک برنامه‌ی اجزاء محدود غیرخطی مبتنی بر مدل تنش مؤثر است و می‌تواند برای تعیین بزرگ‌نمایی یک‌بعدی ساختگاه، شبیه‌سازی روانگرایی، و بررسی آثار آن در پروفیل‌های افقی و نسبتاً شیب‌دار استفاده شود. به طور کلی نرم‌افزار CYCLIC۱D از یک ساختار کاملاً همبسته‌ی دو فاز^{۱۵} (خاک و سیال) براساس تئوری بایو^{۱۶، ۲۴} برای جریان موجود در محیط متخلخل اشباع استفاده می‌کند و در آن، رفتار تنش - کرنش خاک به وسیله‌ی یک مدل رفتاری غیرخطی کنترل می‌شود، که در آن ساختار کلی حالت خمیری چندسطحی^{۱۷} استفاده شده است.

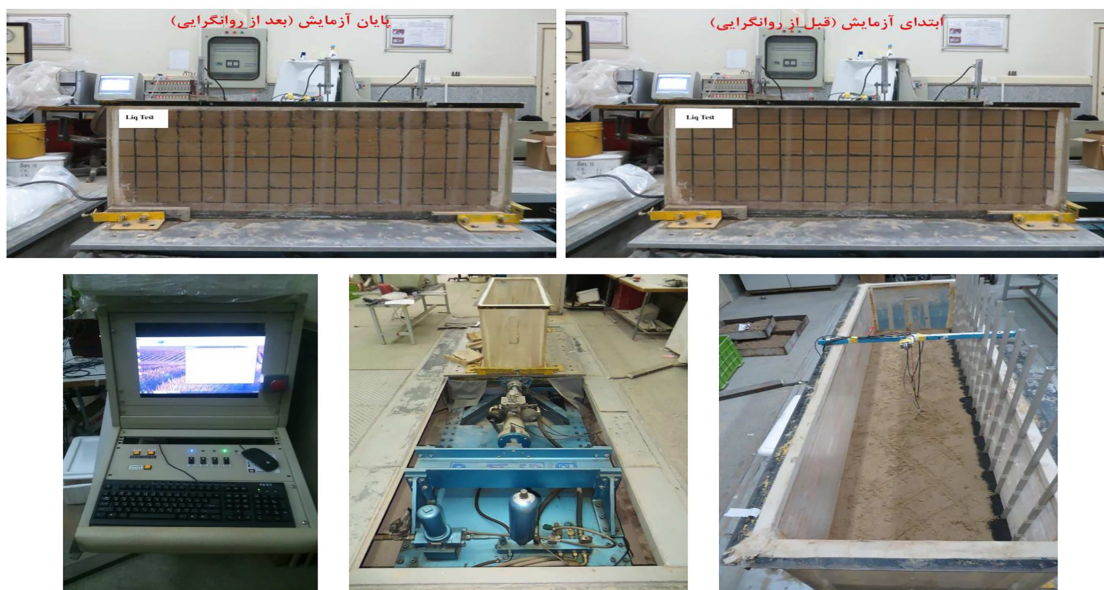


شکل ۱. نمای شماتیکی از پروفیل مدل آزمایش.

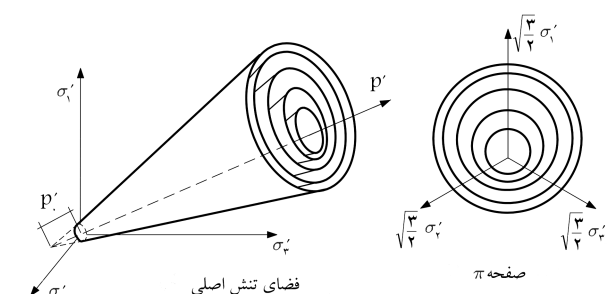
مقیاس‌سازی^{۱۲} ارائه شده توسط یایی (۱۹۸۹)^[۲۵] بوده است. به طوری که با توجه به ابعاد جعبه‌ی میز لرزه و پارامترهای مورد بررسی در مسئله، با فرض کل پروفیل خاک به ارتفاع ۲۳ متر، شامل یک زیرلایه‌ی روانگراشونده‌ی ۸/۵ متری، شاخص مقیاس (مقیاس واقعی: مقیاس مدل) برابر ۱:۳۵ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی فیزیکی آزمایش‌ها با استفاده از میز لرزه‌ی دانشگاه تهران انجام شده است که عرشه‌ی فولادی به ابعاد ۱۷۰ سانتی‌متر و یک جک هیدرولیکی به ظرفیت معادل ۲۱ کیلونیوتن دارد. میز لرزه‌ی مذکور قادر به اعمال محدوده‌ی بسامدی تحریک ورودی از ۰/۱ تا ۲۵ هرتز با دامنه‌ی جابه‌جایی ۱۲۱± میلی‌متر و دامنه‌ی شتاب بیش از ۱g است. جعبه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌ها، از ورقه‌های پلکسی‌گلس با ابعاد داخلی ۱/۸ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۷ ارتفاع ساخته شده است. تصویری از میز لرزه‌ی دانشگاه تهران و ملحقات جعبه‌ی آزمایش مورد استفاده به همراه مدل ساخته شده‌ی قبل و بعد از آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.

در تمامی آزمایش‌ها از ماسه‌ی خردشده‌ی ۱۶۱ فیروزکوه^[۲۶] با تراکم‌های مختلف و با رطوبت ۵٪ جهت مدل‌سازی لایه‌های زیرین و از ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به همراه ۴۰٪ رس با حالت خمیری نسبتاً بالا برای مدل‌سازی رویه‌ی غیرروانگرا استفاده شده است. لازم به توضیح است که هر دو مدل به روش لایه به لایه و در شرایط یکسان ساخته شده‌اند. در ابتدا خاک آماده شده از ارتفاع مشخصی به روش بارش به صورت یکنواخت درون جعبه ریخته شد، تا ۵ سانتی‌متر اول برای کوبش آماده شود. پس از کوبش یکنواخت لایه با استفاده از کوبه‌ی دستی و رسیدن به تراز موردنظر در تمام سطح مدل، لایه‌ی بعدی آماده‌ی ریختن و کوبش شد. قبل از



شکل ۲. تصویری از میز لرزه‌ی دانشگاه تهران و ملحقات آن به همراه مدل ساخته شده‌ی قبل و بعد از آزمایش.

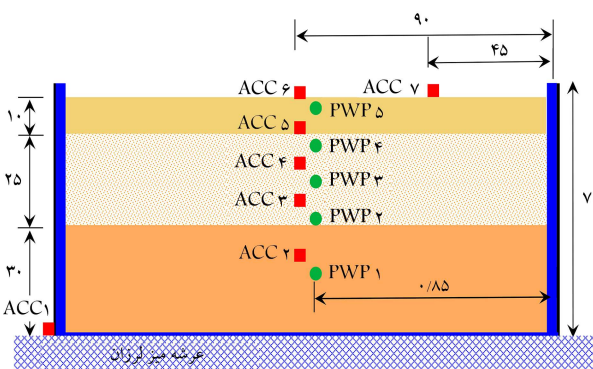


شکل ۴. سطح تسلیم مخروطی در فضای تنش اصلی و صفحه‌ی π . [۴۱، ۳۳]

تناوبی مجدداً به وسیله‌ی یک قانون جریان جدید^{۲۱} بازنویسی شده است. همان‌طور که گفته شده است، مدل‌های رفتاری ذکر شده در کدهای عددی اجزاء محدود به کار رفته‌اند و ۳ مؤلفه‌ی اصلی آن‌ها، شامل: تابع تسلیم،^{۲۲} قانون سخت‌شوندگی،^{۲۳} و قانون جریان هستند.

– تابع تسلیم: براساس قراردادهای حالت خمیری کلاسیک فرض می‌شود که خاصیت حالت خمیری در مصالح، خطی و همسان است و ناهمسانی و غیرخطی بودن در نتیجه‌ی رفتار خمیری ایجاد می‌شود. توابع تسلیم انتخاب شده، حالت یک سطح مخروطی در فضای تنش به خود گرفته‌اند (شکل ۴) که محور آن در امتداد محور هیدرواستاتیکی قرار دارد. در فضای حالت خمیری چندسطحی، [۴۱، ۲۹، ۲۸] مطابق با شکل ۴، تعدادی از سطوح تسلیم مشابه به وسیله‌ی نقاط اوج و اندازه‌های متفاوت خود، ناحیه‌ی سخت‌شوندگی را تشکیل می‌دهند، که در آن بیرونی‌ترین سطح، پوش گسیختگی را تشکیل می‌دهد.

– قانون سخت‌شوندگی: قانون سخت‌شوندگی حرکتی به منظور ایجاد پاسخ هیستریزس تحت بارگذاری برشی تناوبی ایجاد شده است. قانون سخت‌شوندگی، قانون اصلاح‌شده‌ی قانون اولیه‌ی امرز، [۲۸] است و به منظور بهبود توانمندی



شکل ۳. ابزارگذاری مدل ساخته شده (ابعاد بر حسب سانتی‌متر و در مقیاس مدل است).

۱.۳. مدل رفتاری حالت خمیری چندسطحی

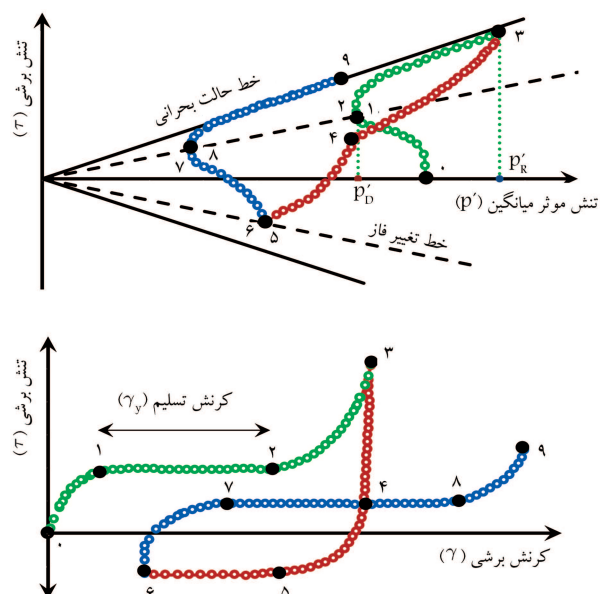
مدل‌های پیشرفته‌یی که کاربرد وسیعی در مدل‌سازی‌های نوین ژئوتکنیک دارند، به ۳ بخش کلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های سطح مرزی [۲۵-۲۷]، مدل‌های چندسطحی، [۲۷-۲۸] و مدل‌های حالت خمیری تعمیم‌یافته. [۲۹-۳۸] مدل چندسطحی در ابتدا توسط امرز، [۲۸] و ایوان، [۲۹] پیشنهاد شده است. مدل مذکور، سخت‌شوندگی همسان - حرکتی^{۲۰} و مشابه با مدل سطح مرزی دارد. در مدل پیشنهادی، برخلاف مدل سطح مرزی، که شامل فقط دو سطح است، مجموعه‌یی از سطوح مشخص $(f_0, f_1, f_2, \dots, f_n)$ تعریف شده است. پروو (۱۹۸۵)، [۴۱] مفهوم چندسطح تسلیمی را برای رفتار خاک فرمول‌بندی کرد و چند سال بعد آن را در DYNFLOWTM به کار گرفت. [۳۱] مدل ذکر شده به طور موفقی در برخی از آزمایش‌های سانتریفیوژ در پروژه‌ی ولکس (VELACS)، [۷] استفاده شده است.

بر پایه‌ی چهارچوب دستورالعمل حالت خمیری چندسطحی، [۴۱، ۲۹، ۲۸] مدل‌های رفتاری پیشرفته‌تری، [۳۷-۳۱] گسترش یافتند که در آن‌ها مشخصه‌های پاسخ تحرک

مطابق شکل ۵ شامل این فازهاست: ۱. فاز انقباضی در زیر سطح PT (فاز صفر-۱)؛ ۲. تسلیم و یا روانگرایی کامل طی بارگذاری برشی (فاز ۱-۲) قبل از شروع به اتساع (فاز ۲-۳)؛ ۳. فاز اتساعی در حالت تنش بالای سطح PT (فاز ۳-۲)؛ ۴. فاز انقباضی در طی باربرداری برشی (فاز ۲-۳)، تا زمانی که تنش میانگین مؤثر به P_D باز گردد. قابل ذکر است که فاز ۲-۱ غالباً فقط در تنش‌های میانگین بسیار پایین مشاهده می‌شود. جایی که کرنش برشی تسلیم (γ_y) ممکن است با کمترین تغییر در تنش برشی به صورت تجمعی اضافه شود. بر این اساس، پارامترهای اصلی مدل ذکر شده، شامل خواص دینامیکی خاک، از جمله: مدول برشی بیشینه، زاویه اصطکاک و همچنین ثابت‌های کالیبراسیون برای کنترل آثار اتساع خاک (زاویه خط تغییر فاز، پارامترهای انقباض، و اتساع) و سطح روانگرایی در کرنش تسلیم است.

۴. اعتبارسنجی مدل عددی

همان‌طور که پیش از این بیان شد، مدل عددی آزمایش‌های فیزیکی در نرم‌افزار عددی اجزاء محدود CYCLIC۳D و بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی توسعه داده شده است. بدین صورت که از مدل رفتاری حالت خمیری چند سطح تسلیمی [۲۹، ۳۰] برای مدل‌سازی رفتار مصالح استفاده شده است. مدل عددی هم‌اندازه با مقیاس آزمایشگاه به ابعاد داخلی ۰٫۷ متر ارتفاع ساخته و مرز کف به علت شرایط موجود در آزمایش به صورت صلب در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی دقیق، شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج ACC1 در هر دو مدل با اعمال اصلاح خط مبنا (BLC) ۲۵ به‌عنوان شتاب ورودی به کف مدل عددی اعمال شده است. در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی مسئله‌ی موردنظر، با توجه به آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی نشده ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، [۲۱] و پارامترهای پیشنهادی توسط الگمل و همکاران، [۲۲] از پارامترهای مدل رفتاری چندسطح تسلیمی ارائه شده در جدول ۲ برای ۳ لایه‌ی مجزا استفاده شده است.



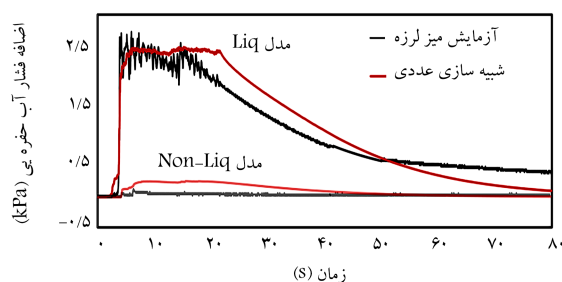
شکل ۵. شمایی از پاسخ مدل رفتاری نشان دهنده‌ی سطح تسلیم وابسته به تنش میانگین برای خاک‌های دانه‌یی، رابطه‌ی کرنش برشی - تنش برشی، و رابطه‌ی تنش مؤثر میانگین - تنش برشی برای بارگذاری زهکشی نشده. [۳۳]

عددی اعمال شده است. سخت‌شوندگی حرکتی این گونه بیان می‌شود که سطوح تسلیم در فضای تنش به همراه پوش گسیختگی جابه‌جا می‌شوند.

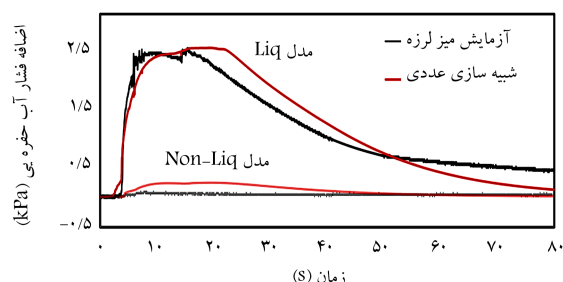
— قانون جریان: در مصالح دانه‌یی، با توجه به شکل ۵، بارگذاری برشی موجب دو پاسخ حجمی (اتساعی یا انقباضی) می‌شود و مرز میان اتساع و انقباض معمولاً به وسیله‌ی سطح تغییر فاز $\tau - p'$ در فضای تنش انحرافی - تنش میانگین مؤثر (به عبارتی $p' - \tau$ در شکل ۵) تعریف می‌شود. [۲۲] همان‌طور که تنش برشی افزایش می‌یابد، پاسخ حجمی خاک از انقباض (زیر سطح PT) به اتساع (بالای سطح PT) تغییر می‌یابد. در شرایط زهکشی نشده، قانون جریان

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری چندسطح تسلیمی استفاده شده برای لایه‌های خاک در مدل‌سازی عددی.

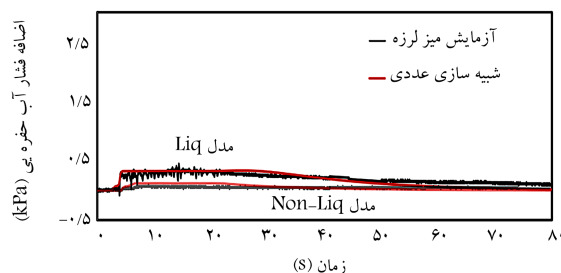
پارامتر	واحدها	لایه‌ی		رویه‌ی ماسه - رس دار سطحی
		متراکم تحتانی	روانگراشونده‌ی میانی	
سرعت موج برشی مبنا (V_{sref})	m/s	۲۵۳٫۵	۱۸۴٫۷	۲۰۰
زاویه‌ی اصطکاک (φ)	درجه	۴۰	۲۹	۱۵
ضریب پواسون (ν)	-	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴
فشار متوسط مرجع (P_0)	kPa	۸۰	۸۰	۵۰
ضریب وابسته به فشار	-	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۶
زاویه‌ی تغییر فاز (φ_{pt})	درجه	۲۲	۳۰	۲۵
پارامتر انقباض (C_1)	-	۰٫۰۱	۰٫۳	۰٫۰۱
پارامتر انقباض (C_2)	-	۰٫۰۶	۰٫۲	۰٫۰۶
پارامتر اتساع (d_1)	-	۰٫۰۶	۰٫۰	۰٫۰۶
پارامتر اتساع (d_2)	-	۱۰	۱۰	۱۰
پارامتر سطح روانگرایی در کرنش تسلیم (Liq)	-	۰٫۰۰۳	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۳



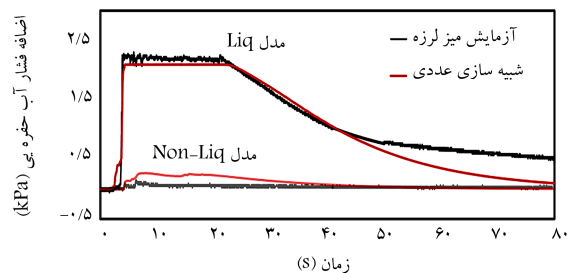
ب) تاریخچه زمان- اضافه فشار آب حفره‌یی در ۲ PWP (عمق ۰/۳۵ m)؛



الف) تاریخچه زمان- اضافه فشار آب حفره‌یی در ۱ PWP (عمق ۰/۰۵ m)؛



د) تاریخچه زمان- اضافه فشار آب حفره‌یی در ۴ PWP (عمق ۰/۰۵ m).



ج) تاریخچه زمان- اضافه فشار آب حفره‌یی در ۳ PWP (عمق ۰/۲۵ m)

شکل ۶. صحت‌سنجی و مقایسه‌ی نتایج اضافه فشار آب حفره‌یی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی.

مدل‌های آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند. حلقه‌های شکل گرفته علاوه بر رفتار غیرخطی خاک، میزان روانگرایی و ایجاد کرنش برشی ناشی از آن را به خوبی ارائه می‌دهند. همان‌طور که مشخص است، حلقه‌های هیستریزس شکل‌گرفته ناشی از اعمال زلزله با شدت کمتر (مدل آزمایش Non-Liq) همواره به صورت خطی بوده است. به عبارتی، تنش‌های برشی کمتر ناشی از اعمال زلزله و به تبع آن کرنش‌های کمتری در آن به وجود آمده است که حاکی از رفتار خطی در پروفیل خاک است. این در حالی است که وقتی بر شدت زلزله‌ی اعمالی افزوده می‌شود (مدل آزمایش Liq)، حلقه‌های هیستریزس به علت به وجود آمدن تنش‌های برشی بیشتر در خاک و همچنین کرنش‌های برشی ناشی از وقوع روانگرایی به شکل غیرخطی هستند. به عبارتی، با افزایش شدت زلزله یا افزایش تنش‌های برشی اعمالی، کرنش برشی نیز افزایش چشمگیری داشته و سهم وقوع روانگرایی در افزایش کرنش برشی نسبت به غیرخطی شدن خاک بیشتر می‌باشد. بنابراین ارتباط مستقیم افزایش فشار آب حفره‌یی یا وقوع پدیده‌ی روانگرایی و رفتار غیرخطی خاک طی مقایسه‌ی انجام‌شده کاملاً مشهود است. به‌طوری‌که افزایش نسبت فشار آب حفره‌یی تا حد نهایی خود ($r_u = 1$) و افزایش کرنش‌های برشی ناشی از آن می‌تواند از انتقال تنش‌های برشی به سطوح بالاتر پروفیل خاک جلوگیری کند.

لازم به ذکر است که تاریخچه‌ی زمانی تنش برشی در مدل آزمایشگاهی با استفاده از نتایج اصلاح شده‌ی حسگرهای شتاب مطابق بر رابطه‌ی ارائه شده‌ی زقال و الگمل^[۲۳] قابل محاسبه است (رابطه‌ی ۱):

$$\tau_z(t) = \sum_{i=n}^{n+1} \ddot{u}_i(t) \cdot \rho_i \cdot \Delta z_i \quad (1)$$

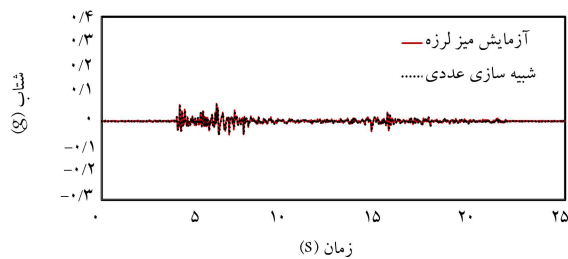
که در آن، شاخص $\ddot{u}_i(t)$ شتاب افقی در بازه‌ی عمق i و در زمان t (حاصل از دو سری تاریخچه‌ی شتاب زمان اصلاح شده)، ρ جرم مخصوص ارتفاع المان فرضی و Δz_i عمق مشخص المان i است. به همین ترتیب کرنش برشی میانگین در عمق مشخص z با استفاده از نتایج ثبت شده‌ی حسگرهای شتاب تحت شرایط فرضی

در نهایت مطابق شکل‌های ۶ و ۷، اضافه فشار آب حفره‌یی و تاریخچه‌های زمان - شتاب در پروفیل خاک با دو مدل اندازه‌گیری شده (آزمایش میز لرزه) و شبیه‌سازی شده (مدل عددی) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی پژوهش حاضر وجود دارد که حاکی از صحت و دقت مناسب مدل عددی در ارزیابی تولید فشار آب حفره‌یی، تحلیل وقوع روانگرایی، و پاسخ‌های سطح زمین است.

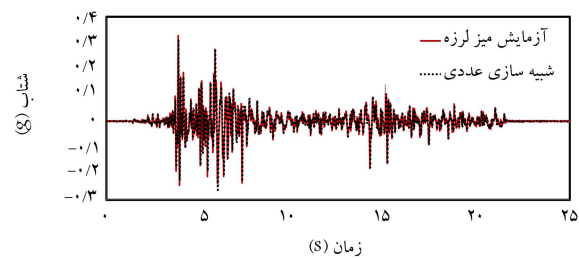
۵. بررسی نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی

با تکیه بر نتایج مدل‌سازی فیزیکی و پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، نتایج مطالعات عددی به همراه نتایج حاصل از آزمایش میز لرزه بررسی و مقایسه شده است. این توضیح لازم است که تحلیل عددی مبتنی بر روش تنش مؤثر امکان در نظر گرفتن تغییرات نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی در عمق پروفیل خاک را در طول تحلیل پاسخ‌ساختگاه در اختیار قرار می‌دهد. در شکل ۸، نتایج نسبت اضافه فشار آب حفره‌یی در سطوح مختلف پروفیل خاک طی تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر نشان داده شده است. تغییرات ناگهانی $r_u = \Delta u / \sigma'_v$ در اعماق میانی پروفیل، نشان‌دهنده‌ی تغییرات خواص دینامیکی و مشخصات لایه‌ی خاک است، که حاکی از استعداد بالای روانگرایی در لایه‌ی میانی است. با توجه به مستعد بودن لایه‌ی میانی برای ایجاد اضافه فشار آب حفره‌یی، نسبت اضافه فشار در لایه‌ی میانی با افزایش دامنه‌ی شدت زلزله بالا رفته است، به‌طوری‌که با اعمال زلزله با دامنه‌ی ضعیف (شکل ۸ب) به مقدار بسیار اندک و در زلزله‌های با شدت بیشتر (شکل ۸الف)، به مقدار بیشینه‌ی خود (برابر با ۱) رسیده است، که به ترتیب بیانگر عدم وقوع روانگرایی و وقوع روانگرایی است.

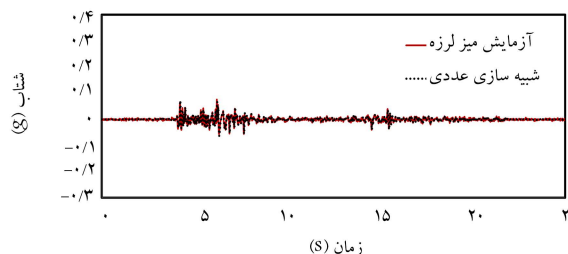
به همین ترتیب شکل ۹، نمودارهای تنش برشی - کرنش برشی (حلقه‌ی هیستریزس)^{۲۶} پروفیل خاک را در عمق میانی لایه‌ی روانگرا (PWP۳) برای



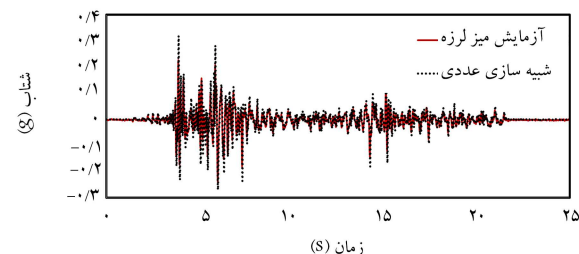
الف) تاریخچه زمان - شتاب در ۱ ACC (عمق ۰/۶۵ m) آزمایش Non-Liq؛



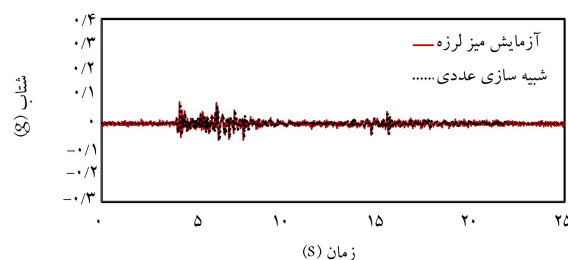
ب) تاریخچه زمان - شتاب در ۱ ACC (عمق ۰/۶۵ m) آزمایش Liq؛



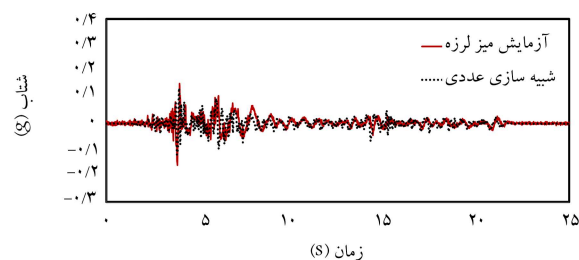
ج) تاریخچه زمان - شتاب در ۲ ACC (عمق ۰/۴۵ m) آزمایش Non-Liq؛



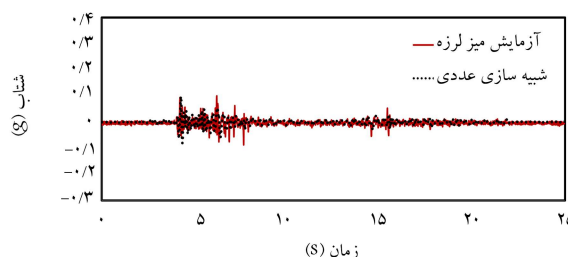
د) تاریخچه زمان - شتاب در ۲ ACC (عمق ۰/۴۵ m) آزمایش Liq؛



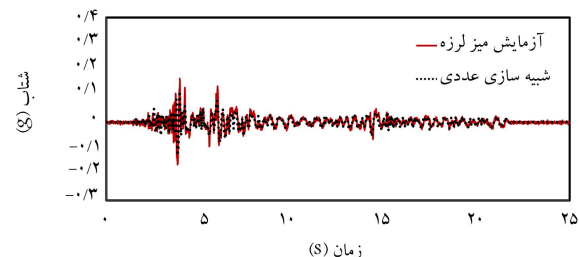
ه) تاریخچه زمان - شتاب در ۴ ACC (عمق ۰/۲ m) آزمایش Non-Liq؛



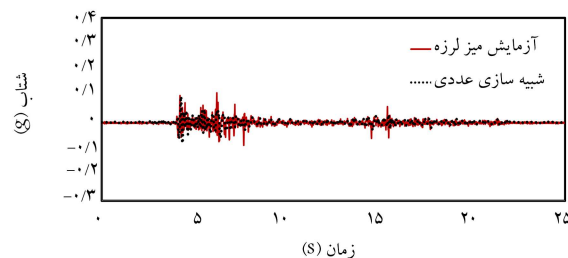
و) تاریخچه زمان - شتاب در ۴ ACC (عمق ۰/۲ m) آزمایش Liq؛



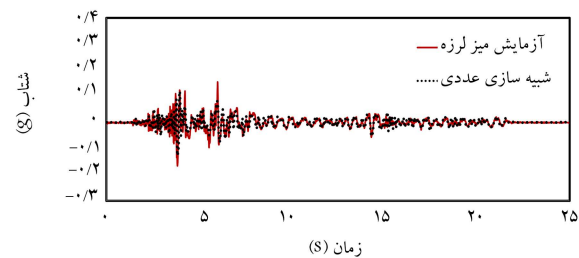
ز) تاریخچه زمان - شتاب در ۵ ACC (عمق ۰/۱ m) آزمایش Non-Liq؛



ح) تاریخچه زمان - شتاب در ۵ ACC (عمق ۰/۱ m) آزمایش Liq؛



ط) تاریخچه زمان - شتاب در ۶ ACC (عمق ۰/۰ m) آزمایش Non-Liq؛



ث) تاریخچه زمان - شتاب در ۶ ACC (عمق ۰/۰ m) آزمایش Liq؛

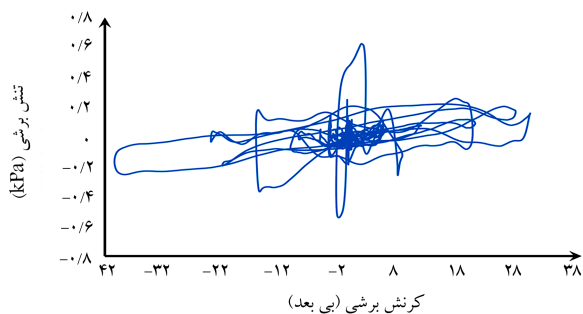
شکل ۷. صحت‌سنجی و مقایسه‌ی نتایج زمان - شتاب شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی.

حلقه‌های هیستریزیس در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی در شکل ۹، تطابق قابل قبولی را بین آن‌ها نشان داده است، که با وجود خطای پذیرفته شده‌ی روش محاسبه‌ی آن‌ها، صحت و دقت نسبی مدل عددی را تا حدود قابل قبولی اثبات کرده است. در شکل ۱۰، طیف پاسخ زلزله در اثر انتشار زلزله‌های با مقادیر دو دامنه‌ی متفاوت (مدل Liq و Non-Liq)، در زیر لایه‌های پروفیل خاک (از بستر تا سطح)

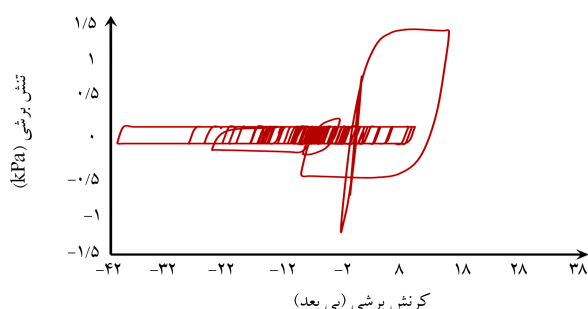
پراکندگی امواج یک بعدی ($\gamma = \partial u / \partial z$) مطابق رابطه‌ی ۲ استخراج شده است:

$$u_z(t) = \frac{u_i - u_{i+1}}{0.5(\Delta z_i - \Delta z_{i+1})} \quad (2)$$

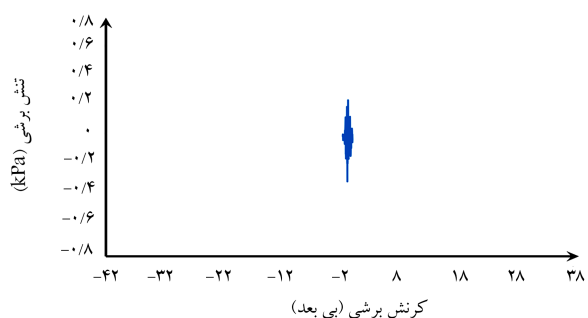
که در آن، صورت کسر بیانگر اختلاف جابه‌جایی افقی بین حسگرهای شتاب بالا و پایین عمق فرضی z و همچنین مخرج آن فاصله‌ی قائم بین آن‌هاست.^[۴۴] مقایسه‌ی



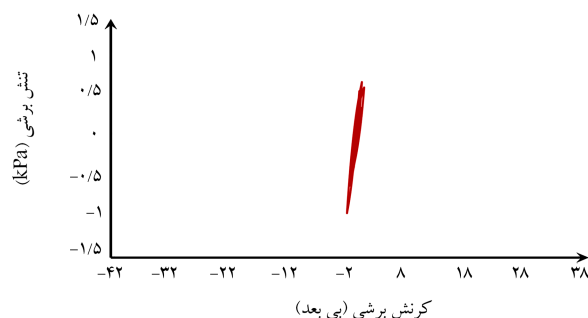
الف) مدل آزمایش $(a_{max}=0.32g)$ Liq؛



ب) مدل شبیه سازی شده $(a_{max}=0.32g)$ Liq؛



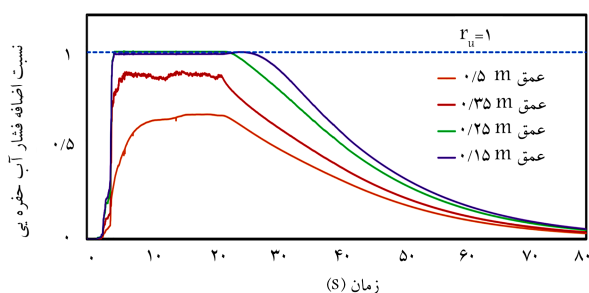
ج) مدل آزمایش $(a_{max}=0.07g)$ Non-Liq؛



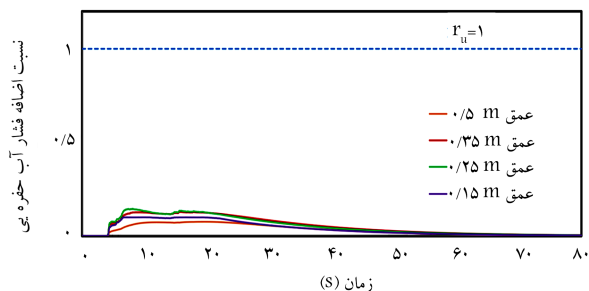
د) مدل شبیه سازی شده $(a_{max}=0.07g)$ Non-Liq.

شکل ۹. مقایسه ای نمودارهای تنش برشی - کرنش برشی (منحنی هیستریزس) شبیه سازی شده و آزمایشگاهی در لایه ی میانی با قابلیت روانگرایی (PWP۳).

زلزله و بزرگ ترین نیروهای وارده در انواع سازه های صلب و حتی انعطاف پذیر، رابطه ی بسیار نزدیکی با پارامتر بیشینه ی شتاب سطح زمین دارند. [۲۲] از این حیث، در شکل (۱۱ الف و ب)، ضریب بزرگ نمایی بیشینه ی دامنه ی شتاب (نسبت بیشینه ی دامنه ی شتاب به بیشینه ی دامنه ی شتاب پایه) به دست آمده در سطوح مختلف لایه های خاک (از کف پروفیل تا سطح) به ترتیب برای دو مدل



الف) تاریخچه زمان - اضافه فشار آب حفره یی در سطوح مختلف Liq؛

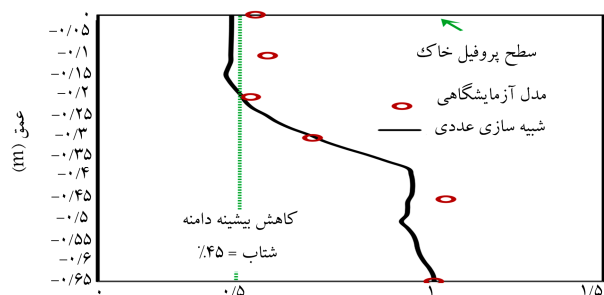


ب) تاریخچه زمان - اضافه فشار آب حفره یی در سطوح مختلف Non-Liq.

شکل ۸. مقایسه ی نسبت اضافه فشار آب حفره یی (r_u) در اعماق مختلف پروفیل شبیه سازی شده در دو مدل روانگر شده و نشده.

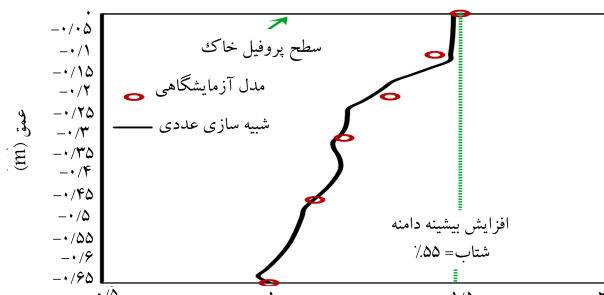
براساس نتایج آزمایشگاهی و تحلیل غیرخطی مبتنی بر تنش مؤثر ارزیابی شده است. با مشاهده ی شکل ۱۰ کاملاً واضح است که رفتار خاک و به تبع آن پاسخ لرزه یی ناشی از آن طی اعمال زلزله ها با دامنه یی کم و زیاد، متفاوت از یکدیگر هستند. به طوری که رفتار کاملاً خطی خاک بدون وقوع روانگرایی در شرایط اعمال زلزله با دامنه ی کم (شکل های ۱۰ ج و ۱۰ د) موجب بزرگ نمایی لرزه یی تا حدود ۲ برابر شده است. با بیشتر شدن دامنه (شکل های ۱۰ الف و ۱۰ ب)، اساساً تغییرات دامنه ی طیف پاسخ در زیرلایه های پروفیل خاک متفاوت تر از حالت قبل است، به طوری که در صورت اعمال این سطح از زلزله به همان پروفیل خاک، بزرگ نمایی طیف پاسخ در وسط لایه ی عمقی متراکم (عمق ۰/۵ متر) مشاهده می شود. اما به محض رسیدن امواج لرزه یی به زیرلایه ی روانگرا (عمق ۰/۲۵)، تغییرات طیف پاسخ به صورت کوچک نمایی لرزه یی (تا حدود ۴۵٪) قابل مشاهده است. از مقایسه ی صورت گرفته در شکل ۱۰ کاملاً مشخص است که تمامی کوچک نمایی لرزه یی ناشی از آثار ساختمانی پروفیل خاک مختص به تأثیر زیرلایه ی روانگراشونده است. از این رو، بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ به وضوح نشان داده است که وجود یک زیرلایه ی روانگراشونده در صورت وقوع روانگرایی می تواند نیروهای ناشی از تنش برشی اعمالی زلزله را به شدت تعدیل و شرایط را به نحوی فراهم کند، که شتاب های با دامنه ی کمتری به سطح پروفیل خاک انتقال یابد. نکته ی حائز اهمیت دیگر در شکل ۱۰ همانند نتایج پیشین، تطابق مناسب و روند منطقی بین نتایج مدل های آزمایشگاهی و عددی است.

از معیارهای مهم در طراحی لرزه یی سازه های روسطحی و حتی زیرسطحی، بیشینه ی شتاب سطح زمین در هنگام زلزله است که براساس ضریبی از شتاب جاذبه ی زمین سنجیده می شود. در واقع بیشینه ی شتاب سطح زمین برای یک مؤلفه ی حرکت، بزرگ ترین مقدار (قدرمطلق) شتاب افقی به دست آمده از مؤلفه ی حرکت است، که معمولاً به علت رابطه ی طبیعی با نیروهای اینرسی جهت تشریح حرکات زمین استفاده می شود. مطالعات پیشین به صراحت بیان داشته اند که شدت



ضرب بزرگنمایی بیشینه دامنه شتاب

الف) مدل $Liq (a_{max}=0.32 g)$



ضرب بزرگنمایی بیشینه دامنه شتاب

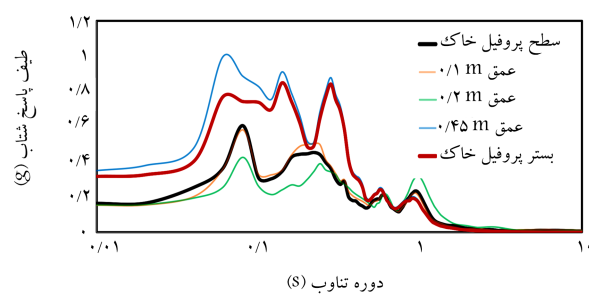
ب) مدل $Non-Liq (a_{max}=0.07 g)$

شکل ۱۱. تغییرات ضریب بزرگنمایی بیشینه دامنه شتاب در اثر وقوع و عدم وقوع روانگرایی در اعماق مختلف پروفیل خاک.

۹۰٪) افت به سزایی داشته و از شدت لرزش در آن کاسته شده است. این روند در لایه سطحی پروفیل خاک (لایه ماسه رس دار) ادامه نداشته و بیشینه شتاب در آن به صورت تقریباً ثابت تا سطح پروفیل باقی مانده است. به عبارت دیگر، لایه روانگراشده میانی همانند لایه با میرایی بالا عمل کرده و موجب کاهش چشمگیری در بیشینه شتاب سطح زمین شده است.

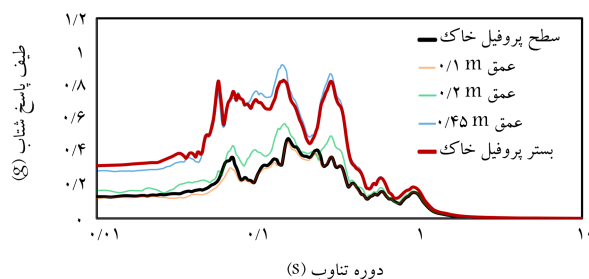
بدیهی است که ضخامت زیرلایه روانگراشده به عنوان یک عامل تعیین کننده در پاسخ لرزه‌یی سطح پروفیل خاک حائز اهمیت است. از این رو، در شکل ۱۲ مقایسه‌یی بین دو مدل مبتنی بر شبیه‌سازی عددی با ضخامت‌های زیرلایه روانگرایی متفاوت انجام پذیرفته است. در تحلیل‌های صورت گرفته، زیرلایه روانگر با ضخامت‌های ۰/۱ و ۰/۲۵ متر به ترتیب برای پروفیل‌های خاک با ضخامت زیرلایه روانگرایی باریک و ضخیم در نظر گرفته شده‌اند، که تحت اعمال شتاب‌های ۰/۳۲ g (وقوع روانگرایی) و ۰/۷ g (عدم وقوع روانگرایی) قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که مشخص است، در حالت وقوع روانگرایی (شکل ۱۲ الف)، پاسخ لرزه‌یی سطح پروفیل خاک شامل زیرلایه روانگرایی ضخیم‌تر، کاهش قابل توجه‌تری نسبت به پروفیل خاک، شامل زیرلایه روانگرایی باریک‌تر داشته است. در نتیجه هر چه ضخامت لایه روانگراشده بیشتر باشد، تنش‌های برشی کمتری به سطح پروفیل می‌رسند و امواج لرزه‌یی در سطح پروفیل خاک کاهیده‌تر می‌شوند. در حالت عدم وقوع روانگرایی (شکل ۱۲ ب)، تغییرات محسوس در پاسخ لرزه‌یی سطح پروفیل خاک در اثر تغییرات ضخامت زیرلایه‌ها مشاهده نمی‌شود و فقط در دوره تناوب ۰/۲ ثانیه، بزرگنمایی اندکی در پروفیل حاوی زیرلایه باریک‌تر مشاهده می‌شود، که احتمالاً ناشی از نرم‌شدگی رویه‌ی سطحی است.



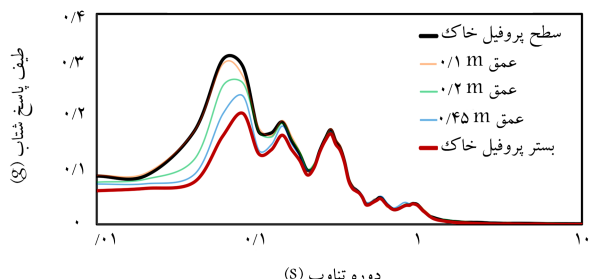
دوره تناوب (S)

الف) مدل آزمایشگاهی $Liq (a_{max}=0.32 g)$



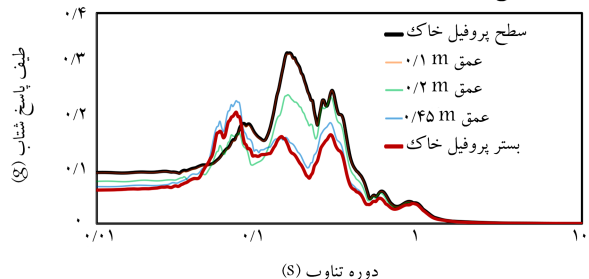
دوره تناوب (S)

ب) مدل شبه سازی عددی $Liq (a_{max}=0.32 g)$



دوره تناوب (S)

ج) مدل آزمایش $Non-Liq (a_{max}=0.07 g)$



دوره تناوب (S)

د) مدل شبه سازی شده $Non-Liq (a_{max}=0.07 g)$

شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج طیف پاسخ شتاب در اعماق مختلف پروفیل شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی در دو مدل روانگراشده و روانگرانشده.

روانگراشده و روانگرانشده در غالب نتایج آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه شتاب‌های بر روی سطح زمین نیز همانند شتاب‌های طیفی در اثر برخورد امواج لرزه‌یی به لایه روانگر با مقدار ۴۵٪ کاهنده شده‌اند. در حالی که تحت شرایط اعمال زلزله‌ی ضعیف و عدم وقوع روانگرایی، ضریب مذکور، بزرگنمایی افزایشی در حدود ۵۵٪ داشته است. نکته‌ی قابل توجه در شکل ۱۱ الف، کاهش محسوس بیشینه شتاب در مرز تقریبی لایه‌های خاک با خواص متفاوت است. به عبارتی با کاهش تراکم و سختی خاک در زیرلایه میانی و همچنین با افزایش اضافه فشار آب حفره‌یی ناگهانی در مرز دو لایه، بیشینه شتاب موج لرزه‌یی در لایه میانی (لایه با تراکم ۱۵٪) نسبت به لایه تحتانی (لایه با تراکم

مسئله پرداخته شده است. در تحلیل می‌تونی بر روش تنش مؤثر می‌توان طیف‌های پاسخ سطح زمین و تغییرات اضافه فشار آب حفره‌یی را در حین و پس از زلزله پیش‌بینی کرد. تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی (آزمایش میز لرزه) و مدل سازی عددی در پژوهش حاضر وجود دارد، که حاکی از صحت و دقت مناسب مدل شبیه سازی شده و مدل رفتاری حالت خمیری چندسطحی در ارزیابی تولید فشار آب حفره‌یی، رفتار غیرخطی خاک، تحلیل وقوع روانگرایی و پاسخ‌های سطح زمین است. به طور کلی مطالعات آزمایشگاهی و عددی پژوهش حاضر نشان می‌دهند که وجود یک زیرلایه‌ی روانگراشونده در صورت وقوع روانگرایی می‌تواند نیروهای ناشی از تنش برشی اعمالی زلزله را به شدت تعدیل و شرایط را به نحوی فراهم کند که شتاب‌های با دامنه‌ی کمتری به سطح خاک انتقال یابد. تحت این شرایط هر چه ضخامت لایه‌ی روانگراشده بیشتر باشد، تنش‌های برشی کمتری به سطح پروفیل می‌رسند و امواج لرزه‌یی در سطح پروفیل خاک کاهیده‌تر می‌شوند. در حالی که رفتار کاملاً خطی خاک تحت شرایط بدون وقوع روانگرایی موجب تشدید بزرگ‌نمایی لرزه‌یی تا حدود ۲ برابر شده است.

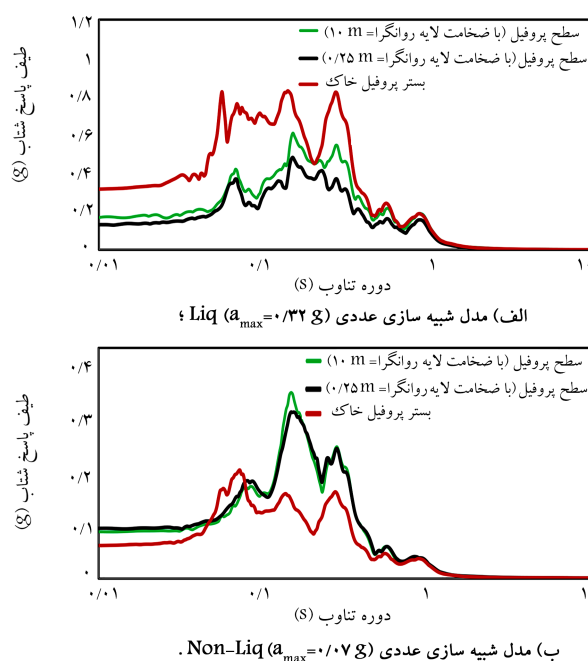
در نهایت، از آنجایی که صحت مدل ایجاد شده در پژوهش حاضر وابسته به اعتبار مدل ساخته شده در آزمایش میز لرزه است، طبیعتاً تمامی محدودیت‌های آن، از قبیل: محدود بودن عمق، مشخصات و تراکم نسبی خاک و در نهایت صلب بودن دیواره‌ها و کف مدل را به همراه دارد. به علاوه شایان ذکر است که مطالعه‌ی حاضر و یافته‌های آن، در غیاب اندازه‌گیری نشست در اثر روانگرایی است و قاعدتاً ظرفیت باربری و نشست لایه‌های بالای لایه‌ی روانگرا تحت تأثیر کاهش مقاومت و سختی لایه‌ی روانگرا خواهد بود که در بحث طراحی‌های لرزه‌یی سازه‌های رو زمینی با توجه به ضخامت زیرلایه‌ی روانگرا باید مورد توجه و کنترل قرار گیرد.

قدردانی

در انتها، از مجموعه‌ی آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تهران و کارکنان محترم آن به منظور همکاری در انجام مدل سازی‌های فیزیکی تقدیر و تشکر می‌شود.

پانوشته‌ها

1. liquefaction
2. period
3. softening
4. physical modeling
5. verification of liquefaction analysis by centrifuge studies (VELACS)
6. Hyogo Ken Nanbu earthquake
7. shaking table test
8. centrifuge test



شکل ۱۲. مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب سطح پروفیل با ضخامت‌های مختلف زیرلایه‌ی روانگراشونده در اثر وقوع و عدم وقوع روانگرایی.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار لرزه‌یی لایه‌های خاک با قابلیت روانگرایی و تأثیر آن‌ها در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین، با استفاده از مدل سازی فیزیکی و شبیه سازی عددی ارزیابی شده است. از این رو، با بهره‌مندی از آزمایش میز لرزه، الگوی اولیه‌ی پاسخ لرزه‌یی به همراه نحوه‌ی افزایش فشار آب حفره‌یی در پروفیل خاک استخراج و در ادامه، در قالب مدل سازی عددی غیرخطی یک بعدی به بررسی و مقایسه‌ی نتایج

9. cyclic loading
10. Constitutive model
11. wildlife liquefaction array, calif
12. scaling
13. accelerometer
14. pore water pressure transducer
15. Two-phase fully couple
16. Biot theory of porous media
17. multi-surface plasticity
18. bounding surface constitutive model
19. generalized plasticity model
20. isotropic-kinematic hardening

21. flow rule
22. yield function
23. hardening rule
24. phase transformation
25. base line correction (BLC)
26. hysteresis curves

منابع (References)

1. Ishihara, K., Acacio, A.A. and Towhata, I. "Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon earthquake", *Soils Found*, **33**(1), pp. 133-154 (1993).
2. Matsui, T. and Oda, K. "Foundation damage of structures", *Soils Found*, pp. 189-200 (1996).
3. Yoshida, N., Tokimatsu, K., Yasuda, S. and et al. "Geotechnical aspects of damage in Adapazari city during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake", *Soils Found*, **41**(4), pp. 25-45 (2001).
4. Acacio, A., Kobayashi, Y., Towhata, I. and et al. "Subsidence of building foundation resting upon liquefied subsoil case studies and assessment", *Soils Found*, **41**(6), pp. 111-128 (2001).
5. Kokusho, T. "Seismic base-isolation mechanism in liquefied sand in terms of energy", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **63**, pp. 92-97 (2014).
6. Youd, T.L. and Carter, B. "Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(7), pp. 811-825 (2005).
7. Taboada, V.M. and Dobry, R. "Experimental results of Model No 1 at RPI", In Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Rotterdam (1993).
8. Mori, S., Miwa, S. and Numata, A. "Shaking table tests to elucidate liquefaction behavior of reclaimed lands of weathered granite during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake", *J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE*, **549**(I-37), pp. 231-248 (1996).
9. Su, D., Ming, H.Y., and Li, X.S. "Effect of shaking strength on the seismic response of liquefiable level ground", *Engineering Geology*, **166**, pp. 262-271 (2013).
10. Yang, J., Sato, T., Savidis, S. and et al. "Horizontal and vertical components of earthquake ground motions at liquefiable sites", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **22**(3), pp. 229-240 (2002).
11. Foerster, E. and Modaressi, H. "Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II-case studies", *Bull. Earthquake Eng.*, **5**(3), pp. 325-345 (2007).
12. Lopez-Caballero, F. and Modaressi-Farahmand-Razavi, A. "Assessment of variability and uncertainties effects on the seismic response of a liquefiable soil profile", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(7), pp. 600-613 (2010).
13. Zheng, W. and Luna, R. "Nonlinear site response and liquefaction analysis in the New Madrid seismic zone", *Geotech. Geol. Eng.*, **29**(4), pp. 463-475 (2011).
14. Groholski, D.R., Hashash, Y.M.H. and Matasovic, N. "Learning of pore pressure response and dynamic soil behavior from downhole array measurements", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **61-62**, pp. 40-56 (2014).
15. Adampiri, M., Alielahi, H., Panji, M. and et al. "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), pp. 3103-3118 (2015).
16. Adampiri, M., Alielahi, H., Koohsari, H. and et al. "Comparison the different methods of seismic response analysis in liquefiable sites against near and far-field earthquakes", *Journal of Engineering Geology*, **11**(2), pp. 1-16 (2016).
17. Karimi, Z. and Dashti, S. "Numerical and centrifuge modeling of seismic soil-foundation-structure interaction on liquefiable ground", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, **142**(1) (2015).
18. Kramer, S.L., Hartvigsen, A.J., Sideras, S.S. and et al. "Site response modeling in liquefiable soil; deposits", 4th IASPEI/IAEE International Symposium (2011).
19. Derakhshandi, M., Rathje, E., Hazirbaba, K. and et al. "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(5), pp. 376-386 (2008).
20. Iai, S. "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, **29**(1), pp. 105-118 (1989).
21. Farahmand, K., Lashkari, A. and Ghalandarzadeh, A. "Firoozkuh Sand: Introduction of a Benchmark for Geomechanical Studies", *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, **40**(2), pp. 133-148 (2016).
22. Elgamal, A., Yang, Z. and Lu, J. "Cyclic1D: A computer program for seismic ground response", Report No. SSRP-06/05, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, C.A. (2006).
23. Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A. "A Web-based platform for computer simulation of seismic ground response", *Advances in Engineering Software*, **35**(5), pp. 249-259 (2004).
24. Biot, M.A. "The mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media", *J. Appl. Phys.*, **33**(4), pp. 1482-1198 (1962).
25. Dafalias, Y.F. and Popov, E.P. "A model for nonlinearly hardening materials for complex loading", *Acta Mech.*, **21**(3), pp. 173-192 (1975).
26. Bardet, J.P. "Application of bounding surface plasticity to cyclic sand behavior", In *Proceedings of the Second International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2-3, pp. 2-16 (1985).

27. Woodward, P.K. and Molenkamp, F. "Application of an advanced multi-surface kinematic constitutive soil model", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **23**(15), pp. 1995-2043 (1999).
28. Mroz, Z. "On the description of anisotropic work hardening", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **15**(3), pp. 163-175 (1967).
29. Iwan, W.D. "On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems", *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME*, **34**(3), pp. 612-617 (1967).
30. Cudny, M. and Vermeer, P.A. "On the modeling of anisotropy and destructuration of soft clays within the multi-laminate framework", *Computers and Geomechanics*, **31**(1), pp. 1-22 (2004).
31. Prevost, J.H. "DYNAFLOW user's manual", Technical Report. Department of Civil Engineering and Operations Research, Princeton University, Princeton, N.J. (1998).
32. Parra, E. "Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems", PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.13 (1996).
33. Elgamal, A., Lai, T., Yang, Z. and et al. "Dynamic soil properties, seismic downhole arrays and applications in practice (CD-ROM). State-of-the-art paper", In: Parakash, S. editor, *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego* (Mar. 26-31, 2001).
34. Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E. and et al. "Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils", *Int. J. Plast.*, **19**(6), pp. 883-905 (2002).
35. Elgamal, A.W., Dobry, R., Parra, E. and et al. "Soil dilation and shear deformations during liquefaction", In *Procs. 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, S. Prakash, ed.*, pp. 1238-1259 (Mar. 8-15, 1998).
36. Yang, Z. "Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction", PhD Dissertation, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, New York: Columbia University (2000).
37. Yang, Z. and Elgamal, A.W. "Influence of permeability on liquefaction-induced shear deformation", *J. Engng. Mech.*, **128**(7), pp. 720-729 (2002).
38. Chan, A.H.C. "User manual for DIANA-SWANDYNE I", School of Civil Engineering, University of Birmingham, Birmingham, U.K. (1993).
39. Zienkiewicz, A.C., Chan, A.H.C., Pastor, M. and et al., *Computational Geomechanics*, John Wiley and Sons Press, Chichester, U.K. (1999).
40. Aydingun, O. and Adalier, K. "Numerical analysis of seismically induced liquefaction in earth embankment foundations: Part 1. Benchmark model", *Canadian Geotechnical Journal*, **40**(4), pp. 753-765 (2003).
41. Prevost, J.H. "A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **4**(1), pp. 9-17 (1985).
42. Kramer, S. L. "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, N.J. (1996).
43. Zeghal, M. and Elgamal, A.A-W. "Analysis of site liquefaction using earthquake records", *J. Geotech. Eng.*, **120**(6), pp. 996-1017 (1994).
44. Afacan, K.B., Brandenburg, S.J. and Stewart, J.P. "Centrifuge modeling studies of site response in soft clay over wide strain range", *J. Geotech. Geoenvironmental. Eng.*, **140**(2), pp. 1-13 (Feb., 2014).