

تأثیر تغییر مشخصات لایه‌های خاک بر پاسخ سیستم خاک - شمع تحت بار زلزله

صمد میرمحمدرضائی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی اکبر گلشانی* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود 3D FLAC، اثر تغییر مشخصات خاک به صورت تغییر پارامتر سختی در دو لایه‌ی رسی نرم و سخت بر رفتار خاک - شمع تحت بار زلزله بررسی می‌شود. تحلیل دینامیکی با استفاده از شتاب‌نگاشت ورودی سنگ بستر برای بررسی عوامل مؤثر در اندرکنش انجام می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل به صورت تاریخچه‌ی زمانی شتاب، و نیز تبدیل فوریه‌ی سریع شتاب سرشمع نسبت به میدان آزاد در حوزه‌ی فرکانسی ارائه می‌شوند. براساس نتایج حاصل از تحلیل، تفاوت سختی لایه‌های خاک تأثیر به‌سزایی در اندرکنش خاک - شمع دارد، به طوری که دولایه در نظر گرفتن خاک (لایه‌ی نرم بر روی لایه‌ی سخت) -- علی‌رغم افزایش سختی آن -- حالت بحرانی‌تری از خاک یک‌لایه‌ی نرم را نشان می‌دهد و کم‌ترین میزان اندرکنش، جابه‌جایی و لنگر بیشینه مربوط به حالت خاک یک‌لایه است.

واژگان کلیدی: تحلیل دینامیکی، اندرکنش سینماتیکی، رفتار خاک - شمع، بار زلزله، تغییر مشخصات خاک، تبدیل فوریه‌ی سریع، تاریخچه‌ی زمانی شتاب.

samad_mmr@yahoo.com
golshani@modares.ac.ir

۱. مقدمه

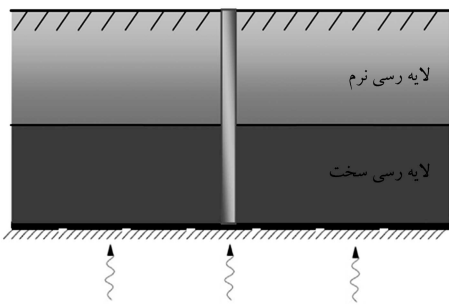
با ابداع نرم‌افزارهای جدید تحلیل دینامیکی، و نیز سهولت و سرعت بیشتر تحلیل دینامیکی سازه‌ها تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌یی که به مدل‌سازی‌های واقع‌گرایانه‌تر و شرایط محیطی دقیق‌تر می‌انجامند، درخصوص تأثیر تغییر عوامل مختلف بر انواع سازه، شرایط محیط پیرامونی و اندرکنش خاک - سازه از دیدگاه‌های مختلف مهندسی عمران -- اعم از ژئوتکنیک، مهندسی سازه، مهندسی زلزله یا تلفیقی از آنها -- تحقیقات بسیاری انجام شده است. در مطالعات انجام‌شده درخصوص تحلیل دینامیکی شمع‌ها، تأثیرات عواملی چون در نظر گرفتن مدل خاک خمیری، تغییر سختی خاک به صورت خطی، یا تغییر فرکانس ارتعاش محیط مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی هرکدام از این عوامل، در طراحی بهینه‌ی شمع‌ها و اصلاح پی‌های شمعی در برابر بارهای جانبی ناشی از زلزله کاربرد به‌سزایی داشته است.^[۱]

برای تحلیل کنشسان دینامیکی و غیرخطی اندرکنش خاک - شمع - سازه، محققین روش المان محدود شبه سه‌بعدی را پیشنهاد کردند.^[۲-۴] در این مدل از میراگرهایی برای شبیه‌سازی محیط نامتناهی خاک استفاده شده است. از المان‌های آجری هشت‌گه‌ری برای نمایش المان‌های خاک، و از المان‌های تیر دوگه‌ری برای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۷/۲۵، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۳، پذیرش ۱۳۸۹/۸/۱۹

نمایش المان‌های شمع استفاده شد. این مدل دو حالت «تسلیم خاک» و «ایجاد درزه بین شمع و خاک پیرامونی» را ترکیب کرد. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک از یک مدل خطی معادل استفاده شده است که در آن به‌جای انجام تغییرات مدول برشی با کرنش، یک مقدار مؤثر منفرد برای تاریخچه‌ی زمانی کامل به کار رفته است. در مدل شمع منفرد، جرم روسازه به شکل جسمی صلب است و حرکت آن توسط جرمی متمرکز در مرکز ثقل آن نمایش داده می‌شود. از المان تیر بسیار سخت با صلبیت پیچشی ۱۰۰۰ برابر شمع، برای اتصال شمع و روسازه استفاده می‌شود. روش پیشنهادی المان محدود، همچنین برای یافتن ضرایب سختی و میرایی وابسته به زمان -- که هر یک برای تحلیل پی‌های در معرض ارتعاش زلزله مفیدند -- کاربرد دارد. در سال ۲۰۰۰ یک روش بررسی سیستم المان محدود سه‌بعدی غیرخطی خاک - شمع توصیه شد که در آن از المان‌های شش‌وجهی هشت‌گه‌ری برای مدل‌سازی شمع و خاک استفاده شد.^[۴] از المان‌های تیرستون دوگه‌ری که دارای شش درجه آزادی برای هر گره است، برای مدل‌سازی قاب سه‌بعدی روسازه‌ی بتنی استفاده می‌شود. همچنین از لایه‌های نازک هشت‌گه‌ری المان‌های صلب متقارن برای ترکیب مودهای تغییر شکل اتصالی، لغزشی و انعکاسی سطح مشترک شمع - خاک استفاده شده است. اندرکنش سینماتیکی و لختی را می‌توان همزمان با استفاده از این مدل شبیه‌سازی کرد. از المان‌های نامحدود دینامیکی برای شبیه‌سازی محیط نامحدود استفاده می‌شود. رکورد حرکت زمین در زلزله به‌عنوان حرکت سنگ بستر



بار ارتعاشی ناشی از زلزله

شکل ۱. نمونه‌یی از مدل مورد نظر برای آنالیز تغییر مشخصات خاک.

۱.۱. زمینه‌ی بررسی اندرکنش خاک شمع

پیش‌بینی رفتار شمع‌ها و گروه‌شمع‌ها در طول زمین‌لرزه‌ها، هنوز هم برای مهندسیین ژئوتکنیک مسئله‌ی بحث‌برانگیزی است. ویرانی سازه‌ها ناشی از زمین‌لرزه‌ها همچنان ادامه می‌یابد (زلزله‌ی کوبه^۲، ۱۹۹۴؛ زلزله‌ی نورتریج^۴، ۱۹۹۴). روابط بسیاری پیرامون قوانین متداول و روش‌های مورد استفاده برای طراحی سازه‌ها و پی‌ها وجود دارد. لزوم رعایت خاصیت غیرخطی بودن هندسه و مواد در طراحی پی به‌دنبال گسیختگی‌های فونداسیون ناشی از زلزله‌های اخیر، همانند زلزله‌ی باژ^۵ (۲۰۰۱)، زلزله‌ی چی‌چی^۶ (۱۹۹۹)؛ و زلزله‌ی کوکاپلی^۷ به اثبات رسیده است. طراحی سیستم پی - روسازه برای بارهای زلزله، باید در محاسبه‌ی اثرات پی روی حرکت زمین بر اثر زلزله، اثر تسلیم پی روی بارهای حمل‌شده به‌وسیله‌ی سازه، و اثرات بارهای لختی^۸ تحمیل‌شده به‌وسیله‌ی سازه‌ی مستقر بر پی در نظر گرفته شود. تأثیر پی بر حرکت زمین تحت زلزله را «اندرکنش سینماتیکی»، اثر تسلیم پی بر پاسخ سازه‌یی و اثر بارهای لختی بر پی را «اندرکنش لختی» می‌نامند.^[۹]

در گذشته به شتاب‌ها، سرعت‌ها یا جابه‌جایی‌های میدان آزاد، به‌عنوان حرکت ورودی برای طراحی لرزه‌یی سازه‌ها - بدون در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سینماتیکی - توجه خاصی می‌شد، اگرچه به‌دلیل وابستگی مسئله‌ی اندرکنش به مشخصات خاک، خواص و ابعاد شمع و فرکانس تحریک، پاسخ شمع ممکن است بیشتر یا کم‌تر از پاسخ میدان آزاد باشد. در طراحی مناسب سازه‌ها و پی آن‌ها، باید هر دو این اثرات (اندرکنش‌های سینماتیکی و لختی)، به‌طور دقیق محاسبه شوند.^[۱]

۲.۱. روش تفاضل محدود صریح

تفاضل محدود صریح یکی از روش‌های قدیمی در حل دسته معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و مقادیر مرزی است. در این روش هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً جایگزین عبارتی جبری می‌شود که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در نقطه‌یی دلخواه در فضا است.

برخی تصور می‌کنند که روش تفاضل محدود فقط به شبکه‌های المانی مستطیلی محدود می‌شود؛ در حالی که با استفاده از روش ارائه‌شده برای به‌دست آوردن معادلات تفاضلی المان‌های دارای شکل دلخواه، می‌توان هر نوع شکلی را برای المان‌ها تعریف کرد. اساس نرم‌افزار «آنالیز سریع لاگرانژی پیوسته در سه بعد (FLAC 3D)»^۹ معادلات روش تفاضل محدود صریح است که برطرف‌کننده‌ی تمامی نیازهای حل مسئله‌ی محیط پیوسته‌ی خاکی است. اگرچه در حل مسائل ایستا انتظار می‌رود 3D FLAC حل ایستای مسئله را بیابد، اما در واقع در فرمول‌بندی معادلات دینامیکی حرکت مورد ملاحظه قرار گرفته‌اند. در مواجهه با مصالح غیرخطی، همیشه امکان

برای این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققین نتیجه گرفتند که مدل خاک در حالت خمیری، به‌طور قابل توجهی پاسخ پی شمعی را از حرکت سنگ بستر منحرف می‌کند.^[۵] در همین زمان، یک مدل المان محدود و ساده‌شده برای تحلیل اندرکنش دینامیکی غیرخطی شمع - خاک برای یک شمع منفرد توسعه یافت.^[۶] این تحلیل با استفاده از روش هم‌زمانی محاسبات انجام یافت. در این تحقیق مدل‌سازی تغییرشکل و تغییرات فشار آب حفره‌یی به‌وسیله‌ی بالابردن و اتلاف فشار حفره‌یی به‌صورت هم‌زمان انجام می‌شود. در این مدل خاک که از قابلیت توصیف رفتار تنش - کرنش ماسه‌ی روان‌گرا برخوردار است، از المان‌های تیر برای مدل‌سازی شمع و از المان‌های هشت‌گویی برای مدل‌سازی خاک استفاده می‌شود. همچنین یک نسخه‌ی مقیاس‌شده از زلزله‌ی کوبه به‌عنوان حرکت ورودی مورد استفاده قرار گرفته است.^[۶] در سال ۲۰۰۴ نیز پژوهش‌گران روش المان محدود سه‌بعدی را برای بازیابی اثرات حالت خمیری خاک (به‌انضمام عمل سخت‌شدگی) و جدایی در سطح مشترک^۱ خاک و شمع، روی پاسخ دینامیکی یک شمع منفرد و گروه شمع‌ها بسط دادند.^[۷] در این روش شمع با یک ماده‌ی کشسان خطی، و خاک با یک حالت خمیری پیشرفته مدل‌سازی شد. المان‌های کلون (فنز و میراگرا) در هر سه جهت (X, Y و Z) برای شبیه‌سازی محیط خاک نامحدود به کار رفت. مدل توسط مؤلفه‌ی شمالی - جنوبی شتاب زلزله‌ی ال‌سنترو، در سنگ بستر بارگذاری شد. جدایی شمع و خاک تنها در راستای بارگذاری مورد ملاحظه قرار گرفت و از اصطکاک بین شمع و خاک صرف‌نظر شد. در هر نقطه‌ی گوسی تنش نرمال در المان‌های خاک (در راستای بارگذاری) و فشار محدودکننده در آن عمق برای هر گام زمانی و در هر تکرار مقایسه می‌شوند. زمانی که تنش نرمال کششی بزرگ‌تر از تنش محدودکننده باشد «جدایی» اتفاق می‌افتد. تحلیل عددی انجام‌شده توسط این محققین مبین این نکته بود که سرعت جدایش، در زمان استفاده از مدل خاک کشسان بسیار بالاتر از مدل خمیری است، اگرچه پاسخ غیرخطی خاک در سیستم خاک - شمع اثر زیادی بر فرکانس‌های تحریک پایین دارد.

به‌دلایل مختلف - اعم از محدودیت نرم‌افزارهای موجود یا عدم دسترسی به سخت‌افزاری توانا برای مدل‌سازی تغییر مشخصات خاک - در تحقیقات انجام‌شده ساده‌سازی‌ها دور از واقعیت بوده است. با توجه به امکانات نرم‌افزاری موجود برای انجام بررسی‌های جدید و دامنه‌دار در خصوص تأثیر تغییر شرایط محیطی در اطراف شمع‌ها بر رفتار متقابل خاک - شمع، بررسی تأثیر تغییر مشخصات خاک پیرامون شمع به‌لحاظ ارائه‌ی شرایط واقع بینانه‌تر طبیعت خاک و نیز میزان تأثیر فصل مشترک جدایی دو لایه خاک مختلف بر پایداری شمع در این نقاط بحرانی تأثیرگذار، از اهمیت به‌سزایی برخوردار خواهد بود.

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر تغییرات مشخصات خاک بر رفتار شمع و خاک تحت بار زلزله است. مدل‌سازی این مسئله ما را به بررسی اندرکنش سینماتیکی خاک - شمع سوق می‌دهد. اثرات سینماتیکی توسط «فرکانس وابسته به توابع انتقال» تشریح می‌شود. تابع انتقال به‌صورت نسبت حرکت پی به حرکت میدان آزاد در غیاب یک سازه در حوزه‌ی فرکانسی تعریف می‌شود.^[۸] برای بررسی این مسئله، نتایج حاصل از تحلیل به‌صورت تاریخیچه‌ی زمانی شتاب و نیز تبدیل فوری‌ی سریع^۲ شتاب سرشمع نسبت به میدان آزاد در حوزه‌ی فرکانسی، ارائه می‌شوند. در شکل ۱ نمای کلی از مدل مورد نظر برای تحقیق حاضر نشان داده شده است که در آن، شمع بتنی در جایز که در لایه‌ی خاک رس نرم قرار گرفته، روی لایه‌ی خاک رس سخت - که در مدل‌سازی‌های مختلف در ارتفاع‌های مختلف نسبت به هم قرار می‌گیرند - تحت بار زلزله تحلیل می‌شوند؛ و در نهایت بحرانی‌ترین حالت مدل‌سازی مشخص خواهد شد.

جدول ۱. مشخصات خاک رس مورد استفاده در تحلیل‌ها.

۲۰	مدول کشسانی خاک (MPa)
۱۱٫۸	وزن مخصوص غوطه‌وری (KN/m ^۳)
۰٫۴۵	ضریب پواسون
۳۴	چسبندگی مؤثر (KPa)
۱۶٫۵°	زاویه اصطکاک داخلی
صفر	زاویه‌ی اتساع
۶۵	سرعت موج برشی (m/s)

جدول ۲. مشخصات شمع به کار رفته در تحلیل‌ها.

۰٫۳۰۶	ممان اینرسی (m ^۴)
۲۰۰	مدول کشسانی (MPa)
۰٫۱۵	ضریب پواسون
۰٫۱۹۶	سطح مقطع (m ^۲)

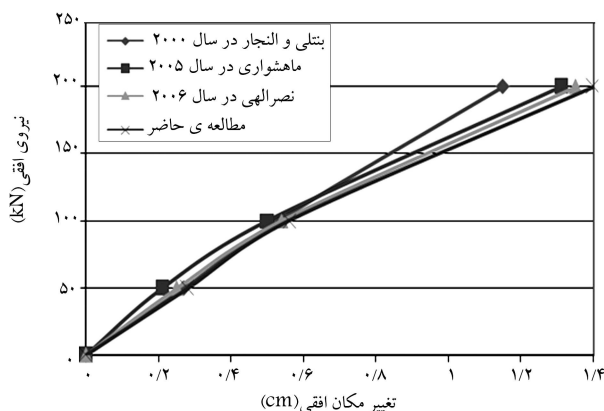
ارائه شده است. اختلاف اندک بین نتایج حاضر و تحقیق‌های پیشین به دلیل در نظر گرفتن رفتار خاک موهر-کولمب در مطالعه‌ی حاضر، و نیز جلوگیری از پیش‌سرمشع در مدل حاضر است. نتیجه‌ی کلی هم‌خوانی خوبی با مطالعات گذشته نشان می‌دهد.

۲.۲. صحت دینامیکی

برای بررسی صحت دینامیکی مدل تحت بار زلزله، به تحلیلی که محققین برای بررسی اثرات خمیرسانی بر مدل سه‌بعدی تحلیل ارتعاشی شمع منفرد انجام داده‌اند، [۱۲، ۱۳] استناد کرده‌ایم.

۱.۲.۲. پارامترها و ابعاد مدل

پارامترهای خاک رس و شمع بتنی به ترتیب مطابق جدول ۳ و ۴ است. مدل تحلیلی، شامل یک لایه خاک رس به ارتفاع ۱۰ متر و شمع از نوع بتنی درجاریز با مقاومت اتکایی است. ابعاد مدل و نوع مش‌بندی نیز مطابق تحلیل مزبور است. پارامترهای فنرهای اتصالی^{۱۱} مورد استفاده در این مدل (جدول ۵)، در محدوده‌ی



شکل ۲. ارزیابی صحت مدل در حالت استاتیکی، برای شمع منفرد.

ناپایداری سیستم وجود دارد. در حالت واقعی، مقداری از انرژی کرنشی به انرژی جنبشی تبدیل شده و پس از تابش از منبع تلف می‌شود. نرم‌افزار FLAC 3D این روند را مستقیماً ادامه می‌دهد زیرا به‌خاطر داشتن اینرسی در خود، انرژی جنبشی را تولید کرده و تلف می‌کند. در جهت مقابل طرح‌هایی که در بردارنده‌ی اینرسی نیستند برای بررسی رفتار سیستم‌های با ناپایداری فیزیکی باید از فرایندهای عددی کمک بگیرند و اگرچه این روند برای پیشگیری از ناپایداری عددی مفید است، لیکن مسیر طی شده از نظر فیزیکی واقعی نیست. در این برنامه از قانون حرکت به‌طور کامل استفاده شده و کاربر نیز از آنچه انجام می‌دهد احساس فیزیکی پیدا می‌کند.^[۱۰] از جمله کاستی‌هایی که در مطالعات انجام شده در گذشته بر روی بررسی رفتار شمع در خاک‌ها وجود داشت، عدم در نظر گرفتن محیط خاک به‌صورت چندلایه، و عدم تحلیل مسئله‌ی اندرکنش تحت بار زلزله، به علت زمان‌بر بودن و پیچیده‌تر بودن مسئله تحت بار زلزله نسبت به بار هارمونیک بود. در این تحقیق سعی شده است تا با رفع این کاستی‌ها به بررسی رفتار متقابل خاک - شمع، تحت بار زلزله، پرداخته شود. برای رسیدن به این هدف از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D که از تمامی قابلیت‌های فوق برخوردار است و در آن زمینه‌ها انعطاف‌پذیری بالایی دارد، استفاده می‌شود. همچنین با افزایش توانایی سخت‌افزارهای رایانه‌ی در دسترس، مشکل زمان‌بر بودن تحلیل تحت بار زلزله نیز تا حد زیادی حل شده است. اگرچه استفاده از این نرم‌افزار به دلیل لزوم رعایت کدنویسی از طریق خط فرمان و نیز رعایت نکات فنی و جزئیات فراوان در مسیر مدل‌سازی و تحلیل نسبتاً مشکل است، کاربرد آن در انجام تحقیقات در زمینه‌های مختلف تخصصی مکانیک خاک بسیار گسترده است.

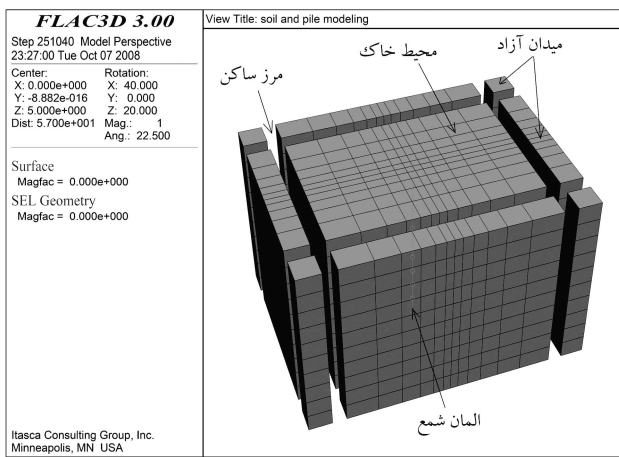
۲. صحت مدل

شمع مورد نظر به طول ۱۰ متر و مقطع دایروی به قطر ۰٫۵ متر، و از نوع باربر انتهایی با فرض گیردار بودن انتهای شمع که در خاک رس به ارتفاع ۱۰ متر روی سنگ بستر قرار دارد، مدل‌سازی می‌شود.

۱.۲. صحت استاتیکی

برای بررسی صحت استاتیکی مدل، از مشخصات خاک و شمع به کار رفته در تحقیق انجام شده توسط دیگر محققین استفاده می‌شود.^[۱۲، ۱۳] (جدول ۱ و ۲)، و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از این تحقیق مقایسه می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر از مدل رفتاری موهر - کولمب برای مدل‌سازی حالت خمیری استفاده شده است.

در شکل ۲ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی شمع در مطالعه‌ی حاضر در تمامی حالات با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی انجام شده در تحقیق‌های محققین دیگر کاملاً مطابقت دارد. همچنین در بارگذاری استاتیکی یک حالت برای خاک در نظر گرفته شده است که عبارت است از رفتار خمیری با فاصله بین خاک و شمع. در این حالت سطوح مختلف بارگذاری به‌طور استاتیکی به سرشمع وارد شده و تغییر مکان ایجاد شده تحت بار وارده کنترل شده است. یادآور می‌شود برای رفتار خمیری در مطالعات برخی از محققین^[۱۲، ۱۳] از مدل رفتاری دراگر-پراگر، و در مطالعات محققین دیگر^[۱۱] از مدل رفتاری سطوح یگانه‌ی سلسله‌مراتبی (Hiss)^{۱۰} استفاده شده است. در این شکل، منحنی تغییر مکان سرشمع در مقابل اعمال نیروی استاتیکی خاک برای مطالعه‌ی حاضر، و نیز نتایج مطالعات ذکر شده



شکل ۳. مدل خاک و شمع برای خاک یک‌لایه.

جدول ۳. مشخصات خاک رس نرم.

چگالی (Kg/m ³)	۱۶۱۰
نسبت پواسون (ν)	۰/۴۲
چسبندگی (C) (KPa)	۳۴
زاویه اصطکاک (φ)	۱۶/۵
زاویه‌ی اتساع (Ψ)	صفر
کشش (T) (KPa)	$۱,۱۴۸ \times ۱۰^۲$
مدول برشی (G) (KPa)	$۴,۱۴۸ \times ۱۰^۳$
مدول بالک (K) (KPa)	$۲۴,۵۴ \times ۱۰^۳$

جدول ۴. مشخصات شمع بتنی با مقطع مربع.

مدول کشسانی (E) (KPa)	$۲,۵ \times ۱۰^۷$
چگالی (Kg/m ³)	۲۴۰۰
نسبت پواسون (ν)	۰/۲۵
محیط شمع (p) (m)	۲
سطح مقطع (A) (m ²)	۰/۲۵
مان اینرسی (I_y) (m ⁴)	$۵,۲۱ \times ۱۰^{-۳}$
I_z (m ⁴)	$۵,۲۱ \times ۱۰^{-۳}$
J (m ⁴)	$۱۰/۴۲ \times ۱۰^{-۳}$

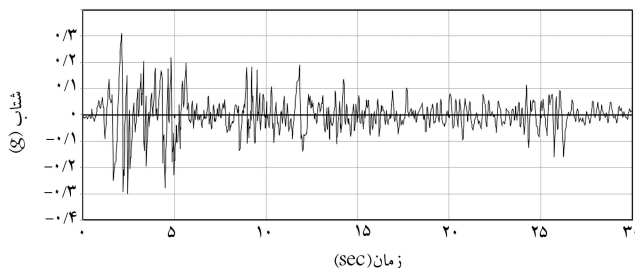
لازم به ذکر است که FLAC 3D، مرز ساکن و میدان آزاد اطراف مدل را پس از قرارت دستور مربوط به این دو حالت، به صورت کامل و با سرعت مناسب در اطراف مدل ایجاد می‌کند.

۲.۲.۲. شتاب‌نگاشت مورد استفاده

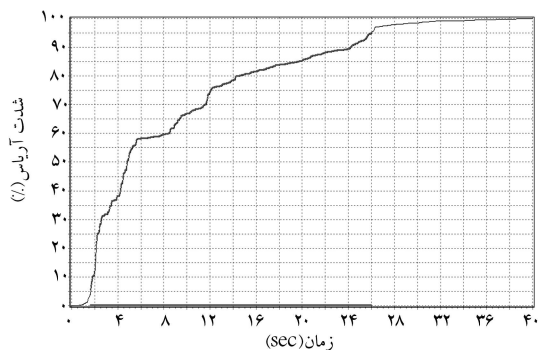
بار زلزله‌ی ال‌سنترو در ۳۰ ثانیه‌ی اول از رکوردها به مدل اعمال شد تا رفتار شمع و خاک پیرامون آن نسبت به رکوردهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند (شکل ۴). زمان مؤثر و نمودار طیف فوریه‌ی این شتاب‌نگاشت توسط نرم‌افزار SiesmoSignal محاسبه، و در ادامه ارائه شده است (اشکال ۵ و ۶). زمان تحلیل تحت هریک از شتاب‌نگاشت‌ها طوری در نظر گرفته شده که زمان مؤثر محاسبه شده را به طور کامل پوشش دهد.

جدول ۵. مشخصات فنرهای اتصالی نرمال و برشی شمع.

Cs-sk (KPa)	۱×۱۰^۷
Cs-scoh (N/m)	۱×۱۰^{۱۰}
Cs-sfric (Deg)	۳۰
Cs-nk (KPa)	۱×۱۰^۷
Cs-ncoh (N/m)	۱×۱۰^{۱۰}
Cs-nfric (Deg)	۳۰



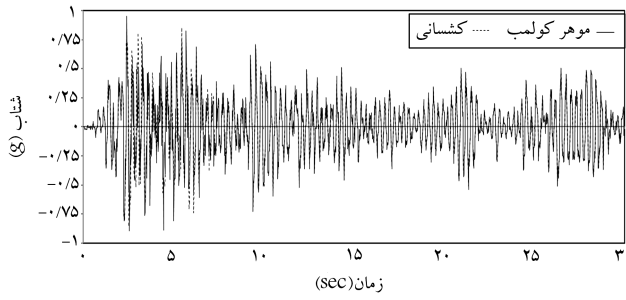
شکل ۴. شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ال‌سنترو (g).



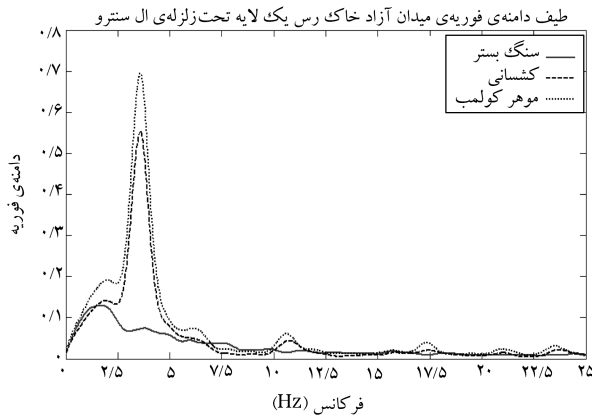
شکل ۵. زمان‌های مؤثر محاسبه شده‌ی زلزله‌ی ال‌سنترو توسط نرم‌افزار SiesmoSignal.

مقادیر تحلیل حساسیت انجام شده بر روی این پارامترهاست که در سال ۱۹۹۹ انجام شد.^[۱۳] با توجه به این نکته‌ی مهم که پارامترهای سختی و چگالی خاک تا حد بسیار زیادی با مدل حاضر مطابقت دارد، و نیز طبق تحلیل حساسیت انجام شده در سال ۱۳۸۵^[۸] پارامترهای مدل حاضر تا حد زیادی قابل قبول است. ابعاد مدل ۱۲ متر در جهت X، ۸ متر در جهت Y و ۱۰ متر ارتفاع در جهت Z، در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

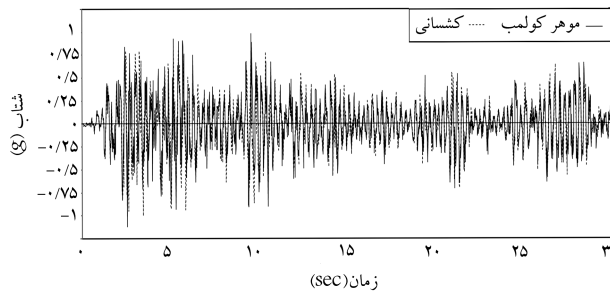
شمع بتنی در جرایز از نوع با مقاومت نوک است و در مرکز مدل قرار دارد. پاسخ شمع و میدان آزاد به دو صورت تاریخیچه‌ی زمانی و طیف فوریه ارائه شده، که بیانگر اندرکنش سینماتیکی شمع منفرد است. چنان که در شکل ۳ دیده می‌شود، در مرز خارجی محیط خاک، از مرزهای ساکن برای جلوگیری از بازگشت امواج دینامیکی زلزله به محیط داخلی خاک استفاده شده است؛ همچنین مدل‌سازی میدان آزاد برای جلوگیری از هرگونه تأثیر حضور سازه‌های اطراف در رفتار شمع و اندرکنش سینماتیکی آن با خاک و در نتیجه واقعی‌تر ساختن نتایج انجام گرفته است.



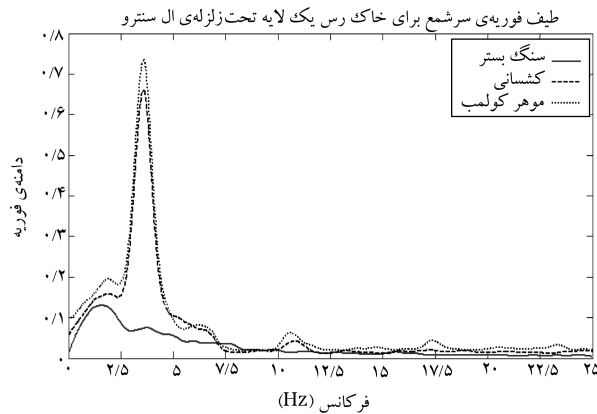
شکل ۸. مقایسه‌ی شتاب پاسخ میدان آزاد، مدل خاک کشسان و موهر - کولمب.



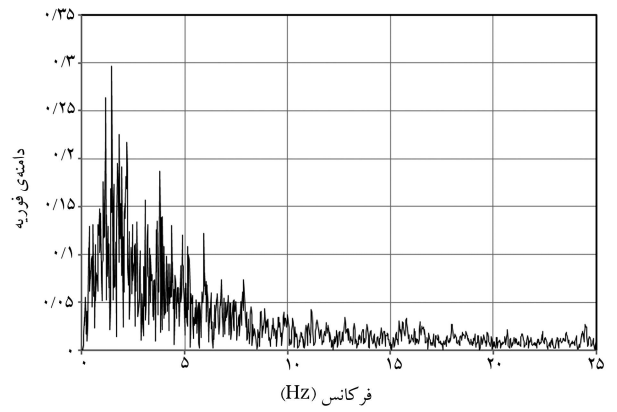
شکل ۹. مقایسه‌ی طیف فوریه‌ی هموارشده‌ی میدان آزاد، مدل خاک کشسان و موهر - کولمب.



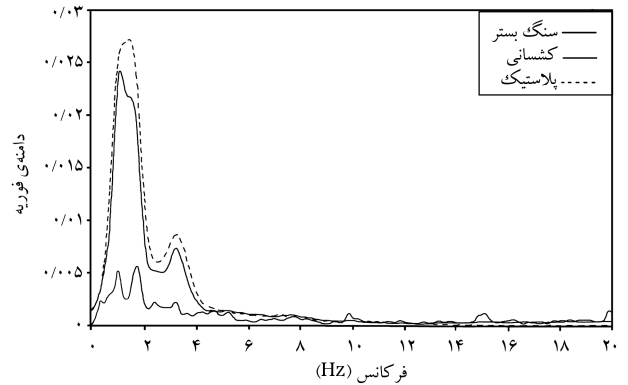
شکل ۱۰. مقایسه‌ی شتاب پاسخ و طیف فوریه‌ی سرشمع، مدل خاک کشسان و موهر - کولمب.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی طیف فوریه‌ی هموارشده‌ی سرشمع، مدل خاک کشسان و موهر - کولمب.



شکل ۶. طیف فوریه‌ی زلزله‌ی ال سنترو.

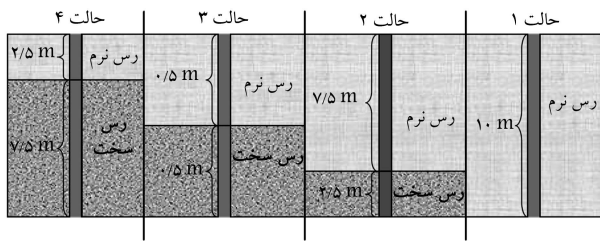


شکل ۷. مقایسه‌ی شتاب پاسخ و طیف فوریه‌ی میدان آزاد مدل خاک کشسان و دراگر- پراگر به دست آمده از تحقیقات ماهشواری. [۷] و [۱۱]

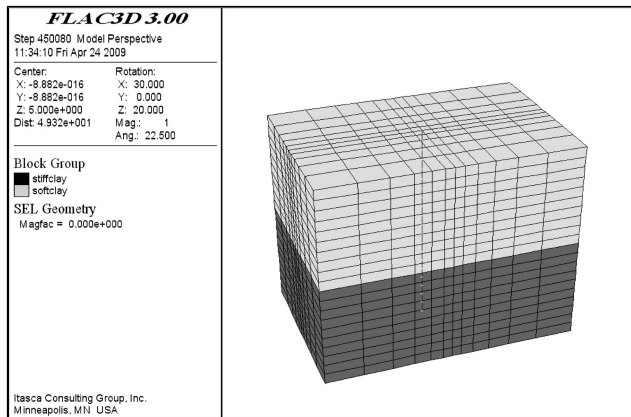
۳.۲.۲. مقایسه‌ی نتایج حاصله با نتایج تحقیقات گذشته

پس از به دست آوردن پاسخ خطی و غیرخطی سه نوع مدل رفتاری خاک کشسان، دراگر- پراگر و نوعی مدل خمیری خاص با سخت‌شدگی کرنشی به نام HISS تحت بار زلزله، محققین به این نتیجه رسیدند که دامنه‌های شتاب بیشینه‌ی میدان آزاد حالات کشسان و خمیری تقریباً مشابه است، ولی در نقاط اوج برای حالت خمیری بیشتر است (شکل ۷).

با انجام تحلیل حاضر برای بررسی صحت اعتبار مدل سه‌بعدی تحلیل ارتعاشی شمع منفرد، [۷] پاسخ شتاب (g) طیف فوریه‌ی هموارشده با ضریب مقیاس ۱ در شکل‌های ۸ تا ۱۱ آمده است. در تمامی پاسخ‌های شتاب به دست آمده از تحلیل، این نکته محسوس است که دامنه‌های شتاب بیشینه برای حالات کشسان و موهر-کولمب تقریباً نزدیک‌اند ولی در اکثر رئوس، دامنه‌ی شتاب برای حالت موهر-کولمب بیشتر است. مسئله‌ی «تقویت دامنه‌ی شتاب بیشینه» بر اهمیت انجام تحلیل غیرخطی تأکید می‌کند. تفاوت یادشده در طیف‌های فوریه‌ی هموارشده‌ی حاصل از پاسخ میدان آزاد و سرشمع مشخص تر است. در تمامی حالات می‌توان شاهد بود که فرکانس غالب پاسخ‌های به دست آمده بیشتر از فرکانس غالب حرکت ورودی سنگ بستر است و تمامی پیک‌های فوریه در نزدیکی فرکانس طبیعی لایه‌ی خاک رس نرم، یعنی حدود ۳/۵ هرتز، اتفاق می‌افتد که نزدیک فرکانس طبیعی دوم موج ورودی است. همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو حالت میدان آزاد و سرشمع در فرکانس‌های بالاتر از ۶ هرتز، از تفاوت بیش از حد در دامنه‌ی فوریه کاسته شده است. این نکته نشان‌گر وابستگی غیرقابل انکار تحلیل‌های دینامیکی اندرکنش به فرکانس ارتعاش محیط است و بر اهمیت بررسی در حوزه‌ی فرکانسی تأکید دارد.



شکل ۱۲. حالات مختلف مدل سازی مشخصات خاک.



شکل ۱۳. نمونه‌یی از مدل خاک و شمع برای خاک دولایه با ارتفاع خاک رس سخت ۵ متر.

نکته‌ی حائز اهمیت دیگر که از بررسی نمودارهای طیف فوری می‌توان استخراج کرد افزایش دامنه‌ی فوری‌ی سرشمع نسبت به میدان آزاد است که نشان می‌دهد حضور شمع در محیط باعث افزایش دامنه‌ی شتاب و آشفستگی پاسخ شمع نسبت به میدان آزاد، و در نتیجه افزایش اندرکش سینماتیکی شمع و خاک شده است. این مسئله به خصوص در مدل تحلیل شده تحت شتاب‌نگاشت‌های با زمان مؤثر ملموس‌تر است. نمودارهای حاصله نشان‌گر سازگاری نتایج حاصل از تحلیل حاضر با نتایج تحلیل‌های پیشین است. همچنین، نتایج بررسی حاضر نشان‌دهنده‌ی اهمیت بررسی اندرکش خاک و شمع با در نظر گرفتن مدل خاک به صورت خمیری است.

۳. تحلیل تغییر مشخصات خاک

۳.۱. پارامترها و ابعاد مدل

پارامترهایی که در این تحلیل برای خاک و شمع مورد استفاده قرار گرفته‌اند، همان پارامترهایی هستند که در تحلیل‌های انجام‌گرفته توسط محققین پیشین، به منظور بررسی رفتار شمع از دیدگاه‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. در تمامی این مطالعات محیط خاک به صورت محیط همگن در نظر گرفته شده است و شمع از نوع بتنی درجاریز با مقاومت انکایی است. می‌توان نتایج تحلیل‌ها را از طریق مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با نتایج موجود خاک یک‌لایه مورد ارزیابی قرار داد. این پارامترها در جدول‌های ۴ تا ۶ ارائه شده است. [۱۱، ۸، ۷]

۳.۲. مرحله‌ی مدل‌سازی

کلیه‌ی تحلیل‌های مربوط به تغییر مشخصات خاک به دو دسته تقسیم شده‌اند: ۱. خاک یک‌لایه؛ ۲. خاک دولایه. در «خاک یک‌لایه» ابعاد مدل خاک مورد نظر به صورت فضایی مکعبی به طول ۱۲ متر در جهت x (Global)، عرض ۸ متر در جهت y ، و ارتفاع ۱۰ متر در جهت z در نظر گرفته شده است. خاک دولایه به صورت یک لایه رس نرم بر روی لایه‌ی رس سخت که پارامترهای مکانیکی آن‌ها در جدول‌های ۴ تا ۶ شرح داده شده است. چنان که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات ارتفاعی این دولایه به ترتیب در ارتفاع‌های ۲٫۵، ۵ و ۷٫۵ متر لحاظ شده است. نمونه‌یی از این تغییر که توسط نرم‌افزار ایجاد شده در شکل ۱۳ آمده است. برای این قسمت از تحلیل سعی شده تا با افزایش تعداد مش‌ها در ارتفاع مدل حل دقیق‌تری از مسئله در این ارتفاع انجام گیرد.

جدول ۶. مشخصات خاک رس.

مشخصه	رس نرم	رس سخت
چگالی (kg/m^3)	۱۶۱۰	۱۸۰۰
نسبت پواسون (ν)	۰٫۴۲	۰٫۴
چسبندگی (kpa)	۳۴	۳۴
اصطکاک (φ)	۱۶٫۵	۱۶٫۵
اتساع (Ψ)	صفر	صفر
کشش (kpa)	$۱٫۱۴۸ \times ۱۰^۲$	$۱٫۱۴۸ \times ۱۰^۲$
مدول برشی (kpa)	$۴٫۱۴۸ \times ۱۰^۳$	$۱۰٫۷۱۴ \times ۱۰^۳$
مدول بالک (kpa)	$۲۴٫۵۴ \times ۱۰^۳$	۵۰×۱۰^۳

۳.۳. بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی

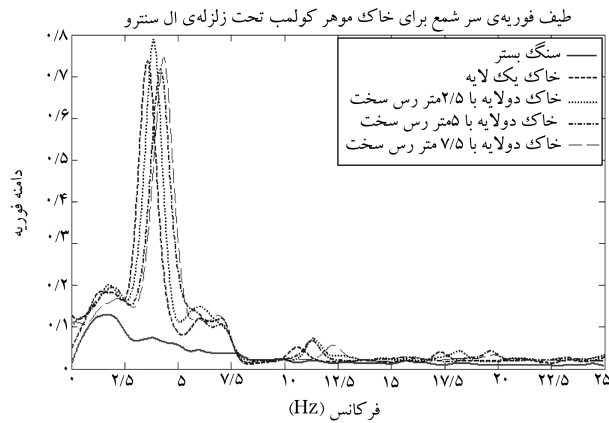
پس از بررسی صحت مدل دینامیکی، به بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل حاصله از تغییرات ارتفاعی لایه‌های خاک می‌پردازیم. در این بخش چون مدل رفتاری موهبرکولمب نمای واضح‌تری از بررسی اندرکش خاک - شمع در بخش بررسی صحت اعتبار ارائه می‌دهد، برای تحلیل خاک از این مدل رفتاری استفاده می‌شود.

۳.۳.۱. مقایسه‌ی شتاب و طیف فوری‌ی میدان آزاد و سرشمع چهار حالت مدل‌سازی

افزایش سختی خاک منجر به افزایش مجموعه دامنه‌های بیشینه شتاب می‌شود (شکل ۱۴). این افزایش را می‌توان به کاهش میرایی در خاک‌های سخت - نسبت به خاک‌های نرم - نسبت داد. افزایش دامنه‌ی شتاب سرشمع نسبت به میدان آزاد نیز ناشی از همین افزایش سختی شمع نسبت به خاک پیرامونی است. یادآور می‌شود در روند افزایش سختی خاک از ۲٫۵ متر به ۷٫۵ متر، نسبت شتاب بیشینه‌ی سرشمع به میدان آزاد در ثانیه‌ی ۲٫۵ (بیشترین دامنه) از حالت ۱ تا ۴ به ترتیب ۱٫۷۵۳، ۱٫۷، ۱٫۸۳، ۱٫۸۸ است که از ۵ درصد تا ۱۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

این روند در پیک‌های دیگر پاسخ شمع نسبت به میدان آزاد نیز دیده می‌شود. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود که افزایش سختی خاک منجر به افزایش فرکانس غالب محیط خاک - شمع شده است؛ و مشخص است که از فرکانس ۳ هرتز برای خاک یک‌لایه، تا حدود ۳٫۸ هرتز برای خاک دولایه با ۲٫۵ متر رس سخت، ۴٫۲ هرتز برای خاک دولایه با ۵ متر رس سخت، و ۴٫۵ هرتز برای خاک دولایه با ۷٫۵ متر رس سخت متغیر است. این مسئله در فرکانس‌های غالب دوم حالت‌های مدل‌سازی نیز تا حد بسیاری مشهود است. نتیجه‌ی فوق بر وابستگی تحلیل ارتعاشی مدل به فرکانس ارتعاش محیط تأکید دارد.

در بررسی دامنه‌ی هموارشده‌ی فوری (اشکال ۱۵ و ۱۶) مشاهده می‌کنیم که



شکل ۱۶. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی فوریه‌ی هموارشده‌ی سر شمع برای چهار حالت شکل ۱۲.

در حالت ۲/۵ متر رس سخت با بحرانی‌ترین حالت -- نسبت به سه حالت دیگر -- مواجه‌ایم که نشان‌گر محتوای فرکانسی غنی‌تر شتاب سرشمع و میدان آزاد در این حالت است.

مشاهده می‌شود که طیف دامنه‌ی فوریه‌ی هموارشده‌ی پاسخ شمع برای حالت ۵ متری، در مقایسه با حالت یک‌لایه، کم‌تر از دو حالت خاک دولایه‌ی دیگر است. می‌توان گفت که در دو حالت دیگر خاک دولایه، یعنی ۲/۵ و ۷/۵ متر رس سخت، توزیع نامتقارن سختی خاک منجر به افزایش دامنه‌ی فوریه و حالتی بحرانی‌تر شده است. پس مشخصات نامتقارن خاک تأثیر زیادی در بررسی رفتار ارتعاشی خاک - شمع دارد.

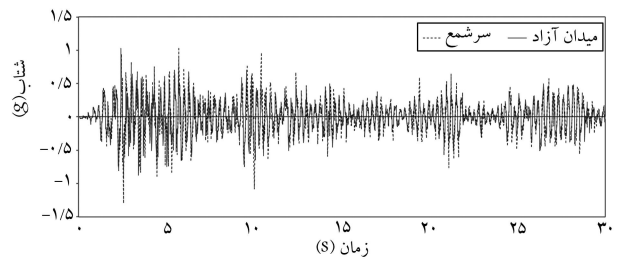
۲.۳.۳. مقایسه‌ی نیروی برشی و لنگر تولید شده در شمع تحت چهار حالت مدل‌سازی

با مقایسه‌ی لنگر بیشینه در سه حالت خاک دولایه می‌توان مشاهده کرد که مقدار لنگر بیشینه در حالت ۲ حدود ۹۳۳۱۰ نیوتن متر، در حالت ۳ برابر ۶۱۱۹۰ نیوتن متر، و برای حالت ۴ برابر ۵۹۲۰۰ نیوتن متر است. از این مقادیر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ارتفاع لایه‌ی رس نرم و ایجاد تغییر مکان‌های بیشتر، نیرو و لنگر بیشتری به شمع اعمال می‌شود. به همین دلیل محل تولید لنگر بیشینه در حالت‌های ۲ و ۳ در لایه‌ی نرم است ولی در حالت ۴ با کاهش تأثیر لایه‌ی نرم در بالا بردن میزان جابه‌جایی و تأثیر بیشتر لایه‌ی سخت در عملکرد محیط، لنگر بیشینه در لایه‌ی سخت تولید می‌شود. طبیعی است که برای هر چهار حالت، نیروی برشی بیشینه ناشی از زلزله در نزدیک سنگ بستر ایجاد شود، اما مشاهده می‌شود که نیروی برشی برای خاک دولایه در حالت ۲ به دلیل وجود لایه‌ی نرم بیشتر، از دو حالت دیگر بیشتر است. این مطلب مؤید نتایج حاصل از بررسی طیف فوریه‌ی شکل‌های ۱۵ و ۱۶ است، که نشان‌گر محتوای فرکانسی بیشتر حالت ۲ (۲/۵ متر رس سخت) است. از نتایج به‌دست آمده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که حالت ۲ در تحلیل‌های انجام‌شده بحرانی‌ترین حالت در زمان اعمال بار زلزله است.

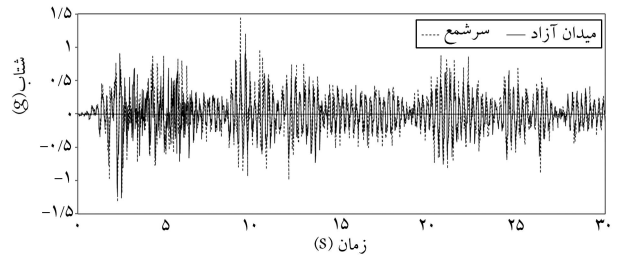
کم‌ترین میزان اندرکنش، نیروی برشی و لنگر بیشینه و تغییر شکل نسبی، مربوط به حالت خاک یک‌لایه است. این مسئله نشان‌گر اهمیت در نظر گرفتن لایه‌بندی و تأثیر نحوه‌ی تغییر مشخصات خاک در بررسی‌های ارتعاشی اندرکنش و طراحی شمع در برابر بارهای لرزه‌یی است.

۳.۳.۳. مقایسه‌ی جابه‌جایی شمع تحت چهار حالت مدل‌سازی

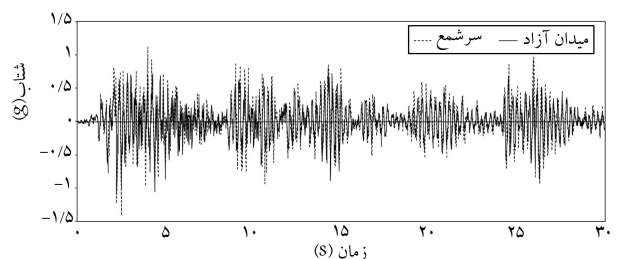
مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی بیشینه در طول شمع حاکی از بیشترین میزان جابه‌جایی



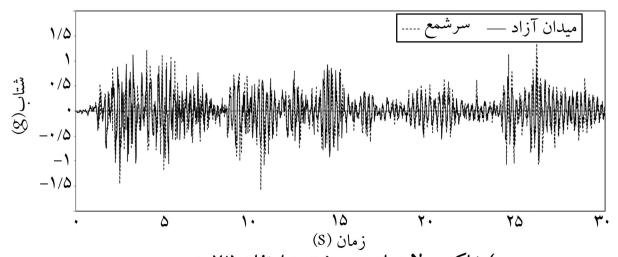
الف) خاک یک لایه؛



ب) خاک دولایه با رس سخت به ارتفاع ۲/۵ متر؛

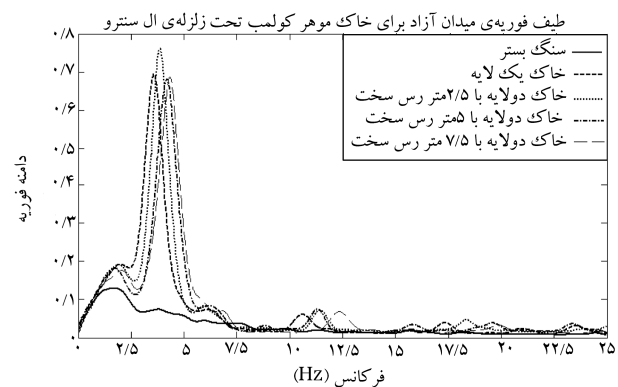


ج) خاک دولایه با رس سخت به ارتفاع ۵ متر؛

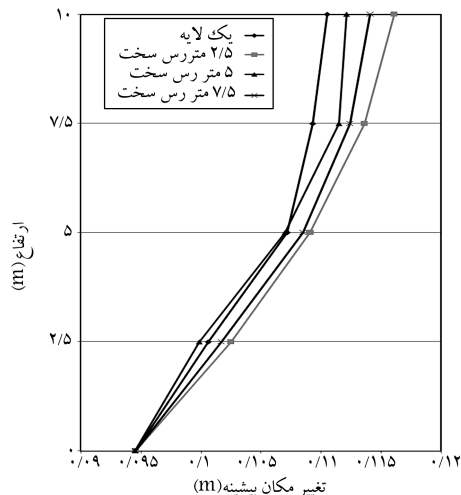


د) خاک دولایه با رس سخت به ارتفاع ۷/۵ متر.

شکل ۱۴. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی شتاب میدان آزاد و سرشمع برای حالت خاک موه‌ر کولمب تحت زلزله‌ی ال‌سنترو.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی طیف دامنه‌ی فوریه‌ی هموارشده‌ی میدان آزاد برای چهار حالت شکل ۱۲.



شکل ۱۷. جابه‌جایی بیشینه‌ی شمع در ارتفاع‌های مختلف از سنگ بستر در چهار حالت مدل‌سازی.

۱. افزایش سختی خاک منجر به افزایش دامنه‌های بیشینه شتاب می‌شود. این افزایش را می‌توان به کاهش میرایی در خاک‌های سخت نسبت به خاک‌های نرم نسبت داد.
۲. دامنه‌ی شتاب سرشمع نسبت به میدان آزاد به‌دلیل افزایش سختی شمع نسبت به خاک پیرامونی بیشتر است و نشان‌گر افزایش اندرکنش خاک شمع است.
۳. افزایش سختی خاک منجر به افزایش فرکانس غالب محیط خاک - شمع شده است. این مسئله در فرکانس‌های غالب اول و دوم حالت‌های مدل‌سازی تا حد بسیاری مشهود است. نتیجه‌ی فوق بر وابستگی تحلیل ارتعاشی مدل به فرکانس ارتعاش محیط تأکید دارد.
۴. با مشاهده‌ی طیف فوریه‌ی هموارشده‌ی سرشمع و میدان آزاد مشاهده می‌شود که دامنه‌ی فوریه در حالت ۲/۵ متر رس سخت بیشترین مقدار است. این امر نشان دهنده‌ی محتوای فرکانسی غنی‌تر شتاب سرشمع و میدان آزاد در این حالت است (بحرانی‌ترین شکل مدل‌سازی). در حالی که در حالت ۵ متری کم‌ترین مقدار به‌دست می‌آید که می‌توان گفت توزیع نامتقارن سختی خاک منجر به افزایش دامنه‌ی فوریه و حالتی بحرانی‌تر شده است.
۵. از بررسی مقادیر نیروی برشی و لنگر بیشینه به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش ارتفاع لایه‌ی رس نرم و ایجاد تغییر مکان‌های بیشتر، نیرو و لنگر بیشتری به شمع اعمال می‌شود. با مقایسه‌ی این مقادیر در حالات مختلف مدل‌سازی، مشاهده می‌شود که هر دو مقدار در حالت ۲/۵ متر رس سخت از دیگر حالات بیشتر است. این امر مؤید نتیجه‌ی به‌دست آمده از نمودارهای طیف فوریه است.
۶. در تمامی نمودارهای به‌دست آمده از تحلیل چهار حالت، مشاهده می‌شود که کم‌ترین میزان اندرکنش، نیروی برشی و لنگر بیشینه و تغییر شکل نسبی، مربوط به حالت خاک یک‌لایه است. این مسئله نشان‌گر اهمیت در نظر گرفتن لایه‌بندی و تأثیر نحوه‌ی تغییر مشخصات خاک در بررسی‌های ارتعاشی اندرکنش و طراحی شمع در برابر بارهای لرزه‌ی است.

برای حالت ۲/۵ متر رس سخت است (شکل ۱۷)؛ این امر مؤید نتیجه‌ی به‌دست آمده از نمودار طیف فوریه‌ی هموارشده است. همچنین جابه‌جایی بیشینه در حالت ۵ متر رس سخت کم‌تراز دو حالت دیگر دولا به است؛ این مطلب نیز با آنچه از نمودارهای طیف فوریه به‌دست آمده مطابقت دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از انجام تحلیل دینامیکی و به‌دست آوردن تاریخچه‌ی زمانی شتاب پاسخ سرشمع و میدان آزاد، و نیز طیف دامنه‌ی فوریه‌ی این شتاب‌ها در چهار حالت مشخصات خاک مشاهده شد که:

پانویس

1. interface
2. fast fourier transform
3. Kobe earthquake
4. Northridge earthquake
5. Bhuj
6. Chi-Chi
7. Kocaeli
8. inertial
9. fast lagrangian analysis of continual in 3 dimensions (FLAC 3D)
10. hierarchical single surface
11. coupling spring

منابع

1. Balendra, S., *Numerical Modeling of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction*, Thesis of Master of Science in

- Civil Engineering, Rodriguez, Department of Civil and Environmental Engineering of Washington State University (2005).
2. Wu, G., *Dynamic Soil-Structure Interaction: Pile Foundations and Retaining Structures*, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia (1994).
3. Finn, L.W.D.; Wu, G. and Thavaraj, T. "Soil-pile-structure interactions", *Geotechnical Special Publication*, **70**, pp. 1-22 (1997).
4. Finn, W.D.L. "Dynamic analysis in geotechnical engineering", *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground Motion Evaluations*, *Geotechnical Special Publication, ASCE*, **20**, pp. 523-591 (1988).
5. Cai, Y.X.; Gould, P.L. and Desai, C.S. "Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure system and application", *Engineering Structures*, **22**, pp. 191-199 (2000).
6. Zhang, J. "Simplified finite element modeling of nonlinear dynamic pile-soil interaction", *Retrieved*, (February 10 2000).

7. Maheshwari, B.K.; Truman, K.Z.; El Naggar, M.H. and Gould, P.L. "Three-dimensional finite element nonlinear dynamic analysis of pile groups for lateral transient and seismic excitations", *Canadian Geotechnical journal*, **41**, pp. 118-133 (2004).
8. نصرالهی، نسیم، بررسی اندرکنش شمع- خاک تحت بارهای لرزه‌یی هارمونیک، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، خاک و پی، دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۵).
9. Makris, N.; Gazetas, G. and Delis, E. "Dynamic soil-pile-foundation-structure interaction: Records and predictions", *Geotechnique*, **46**(1), pp. 33-50 (1996).
10. Itasca, *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC 3D)*, Ver. 3.0, Itasca Consulting Group, Inc. (2005); from: www.itascacg.com.
11. Maheshwari, B.K.; Truman, K.Z.; Gould, P.L. and El Naggar, M.H. "Three-dimensional nonlinear seismic analysis of single piles using finite element model: Effects of plasticity of soil", *International Journal of Geomechanics*, **5**(1), pp. 35-44 (2005).
12. Bentley, K.J. and El Naggar, M.H. "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp. 1368-1382 (2000).
13. Detournay, C. and Hart, R. "FLAC and numerical modeling in geomechanics", *A.A.Balkema Publisher Co.*, p. 512 (1999).

