

تأثیرات سختی خاک و عمق مدفونی پی‌های دایره‌ای بر پاسخ لرزه‌ای یک سازه استوانه‌ای رآکتور

امیرحسین نوروزی (نویسنده مسؤول)، عضو هیأت علمی دانشگاه پیام نور، E-mail: a.noroozi@pnu.ac.ir

محسن گرامی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

رضا وهدانی، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

چکیده: در این تحقیق، تأثیر تغییرات دو پارامتر عمق مدفونی پی و سختی خاک بر روی پاسخ‌های شتاب یک رآکتور استوانه‌ای با ارتفاع ۶۳ متر و قطر پی ۴۰ متر، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، در برابر موج‌های لرزه‌ای سطحی یعنی رابلی، لاو، موج‌های حجمی فشاری (p) و برشی (s) بررسی شده است. در این تحلیل از سه نمونه پی با ارتفاع مختلف و از سه نوع خاک با سختی‌های متفاوت استفاده شده است. بعد از مدل‌سازی سازه و خاک در نرم‌افزاری که اندرکنش خاک-سازه را در نظر می‌گیرد (SASSI)، سیستم در برابر دو زلزله «ال سنتر» و «طبس» به عنوان شاهد به صورت مجزا در قالب هر چهار نوع موج (به صورت جداگانه) تحلیل شده است. از بررسی مدل‌ها این نتیجه به دست آمد که با تبدیل پی سطحی به پی مدفون، به طور میانگین پاسخ‌های شتاب حدود ۳۸ درصد کاهش یافته است. همچنین افزایش عمق مدفونی پی از ۳ متر به ۶ متر، تأثیر چشمگیری در کاهش پاسخ‌های شتاب نداشته است. همچنین با دو برابر شدن سختی خاک، پاسخ‌های شتاب سازه برای نمونه با پی سطحی به طور میانگین حدود ۷ درصد و برای دو نمونه با پی مدفون حدود ۲۰ درصد افزایش یافتند.

کلیدواژه‌ها: معادلات اندرکنش خاک-سازه، موج‌های سطحی، پی مدفون، پی سطحی، سختی خاک

۱- مقدمه

پارامترهایی نظیر ابعاد هندسی پلان سازه، میزان وزن سازه و عمق مدفونی و شکل هندسی پی، به عنوان پارامترهای اندرکنشی خاک و سازه در نتایج تحلیل‌های دینامیکی، تأثیرات مهمی دارند [۳-۴]. در این تحقیق که با استفاده از نرم‌افزار جامع تحلیل‌گر معادلات اندرکنش خاک و سازه (System for Analysis the Soil – Structure Interaction) (SASSI 2000) به روش حجم‌خاکی انعطاف‌پذیر و روش‌های زیر سازه‌ای انجام پذیرفته است، به معرفی و ارزیابی چند پارامتر مهم و مؤثر در تحلیل دینامیکی خطی

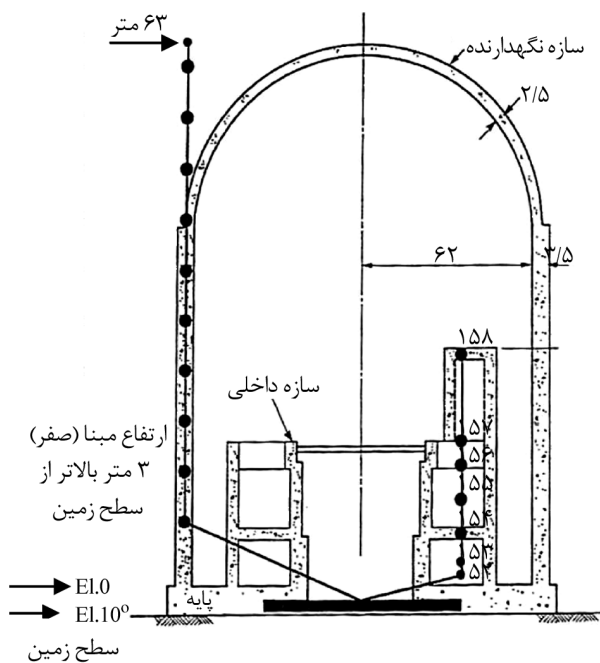
در حوزه مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، عوامل تأثیرگذار زیادی در اندازه نیروهای دینامیکی ناشی از رسیدن امواج لرزه‌ای به ساختگاه وجود دارد [۱]. این عوامل از نظر ابعاد هندسی گسل‌های مولد انرژی لرزه‌ای و نیز شرایط ساختگاه باید توسط روش‌های مهندسی زلزله، معرفی و مقیاس گردد [۲]. بر اساس نتایج تحقیقات اخیر، پارامترهایی نظیر بزرگای ممان لرزه‌ای، فواصل مرکزی زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک، عمق کانونی و مشخصات لایه‌های آبرفتی خاک روی سنگ بستر، به عنوان عوامل ساختگاهی و

ترکیبی «کلوین- واپوت» استفاده شده است [۱۰]. برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم اندرکنش خاک-سازه، روش‌های عددی و تحلیلی متفاوتی پیشنهاد شده است. راه‌حل‌های دقیق تنها از طریق فرمول‌های تحلیلی به دست می‌آیند ولی با یک سری فرض‌های ساده‌کننده می‌توان راه‌حل‌های آسان‌تری به دست آورد. مدل کردن خاک و سازه معمولاً به دو صورت محیط پیوسته و مدل گسسته و یا ساده‌شده انجام می‌گیرد. همچنین روش زیر سازه که در واقع در آن بنوعی از روش‌های محیط پیوسته استفاده می‌شود، به کار می‌رود و اغلب مناسب‌ترین روش می‌باشد، حتی در دستورالعمل بهسازی روش در نظر گرفتن اندرکنش، روش زیر سازه می‌باشد [۱۱]. در این روش مسأله خطی اندرکنش خاک و سازه به چند دسته موضوع و زیر مسأله ساده‌تر تقسیم‌بندی شده است. هرکدام از این زیر مسائل به صورت جداگانه حل و نتایج در گام نهایی تحلیل با هم ترکیب می‌شوند تا با اصل جمع آثار قوا یک حل کامل از موضوع اصلی به دست بیاید. از جمله روش‌های محیط پیوسته روش اجزای مرزی، روش لایه نازک، روش اجزای محدود و روش اجزای نامحدود معادل می‌باشد. در روش اجزای مرزی خاک به صورت بی‌نهایت مدل می‌شود. تنها محدودیت این است که فضا باید همگن باشد. در روش لایه نازک، خاک توسط فرمول نیمه‌تحلیلی بیان می‌شود. این روش تنها نیاز به تقسیم خاک به لایه‌های متعدد در یک جهت دارد. دقت حل مسأله بستگی به تعداد لایه‌های انتخابی و تغییرات مشخصات خاک در ارتفاع دارد. روش اجزای محدود در مسائل دینامیک خاک و فونداسیون، دارای یک مرحله اضافی برای تعریف محیط خاک است. این روش نیاز به تقسیم‌بندی و تعریف اجزای محدود در حجم مشخصی از خاک دارد [۱۲]. روش اجزای نامحدود معادل بر پایه جذب انرژی توسط مرزهای ویسکوز می‌باشد. در این روش احتیاجی به توابع موجی نیست؛ زیرا موج‌ها در فصل‌های مشترک با اجزای محدود و نامحدود مجاور توسط میراگرهای معادل، جذب می‌شوند [۱۳]. روش‌های مدل‌های ساده‌شده شامل نیمه‌تجربی و تخمین‌های

یک سازه راکتور به همراه پی گسترده دایره‌ای زیر آن پرداخته شده است. این پارامترها نظیر فرکانس‌های غالب دسته‌ای از امواج سطحی، دامنه‌های طیفی مدل زلزله‌های طبیعی ال‌سنتر و طیبس و نسبت‌های مشخصی از پارامترهای امیدانس دینامیکی پی و خاک زیر و اطراف آن می‌باشد [۵]. بر اساس تحقیقات انجام‌شده در زمینه ژئوتکنیک لرزه‌ای و اندرکنش خاک و سازه توسط محققینی نظیر «هسکل»، «تامسون»، «کازل»، «راست»، «سید» و «آبراهامسون»، فرمول‌بندی ترکیبی معادلات تنش و جابه‌جایی دینامیکی برای محیط‌های خاکی همگن و همسانگرد، دارای بسط و توسعه ماتریسی بوده و با توجه به لایه‌ای بودن خاک و تغییرات سختی برشی و امتداد امواج برخوردی به لایه‌های رویی، امکان تشکیل ماتریس‌های سختی و انتقالی لایه‌ای در نرم‌افزار فراهم آمده است [۶-۸].

در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، سیستم خاک حفاری‌شده به همراه پی و رو سازه، با توجه به تأثیرات غیرخطی و تغییرات ناپهنگام و شدید پاسخ درجات آزادی کوپله به خصوص در حد فاصل نقاط گرهی رو سازه و پی، در نظر گرفته شده است. بنابراین برای برطرف نمودن اغتشاشات شدید دامنه پاسخ‌ها و امکان حصول نتایج مهندسی و طیفی پاسخ دینامیکی، انجام تحلیل فرکانسی خاک و سازه، توسط نرم‌افزار فراهم آمده است [۹]. از تکنیک‌های عددی تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها و دینامیک سیستم فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر، برای آماده‌سازی مؤلفه‌های طیفی تکان‌های قوی زمین، در مازول‌های نرم‌افزار، استفاده شده است. در تحلیل‌های این کد محاسباتی از تکنیک‌های عددی پیشرفته سوارسازی ماتریس‌های سختی لایه‌ای و تشکیل معادلات امیدانس دینامیکی که تابعی از نسبت فرکانس‌های غالب امواج لاو و رایلی (وابسته به طول موج و ضخامت لایه) به فرکانس ارتعاش طبیعی مدل دو بعدی لایه‌ای می‌باشند، استفاده شده است. همچنین در تشکیل معادلات ارتعاش آزاد ساختگاه، از تکنیک نیم فضای بستر سنگی و مدل سختی-میرایی

شده است. باید توجه داشت که سازه مذکور سازه معرفی شده در دستورالعمل نرم‌افزار SASSI 2000 که در این تحلیل از آن استفاده شده است. نرم‌افزار شامل تعدادی از ماژول‌های برنامه‌ای وابسته به هم است که با استفاده از آن‌ها می‌توان مسائل دینامیکی اندرکنش خاک-سازه را در حیطه وسیعی در حالت دو بعدی و سه بعدی حل کرد. در این تحلیل، رو سازه (*superstructure*) ثابت با سه نوع پی تحلیل می‌شود که در واقع با در نظر گرفتن این سه پی در مجموع سه نوع سازه وجود دارد.



شکل (۱): شمای کلی سازه متشکل از دو بخش خارجی (نگهدارنده) و داخلی.

۲-۱- مدل کردن خاک

خاک همگنی که سازه روی آن قرار گرفته و در نرم‌افزار مدل می‌شود از یک محیط نیمه‌بینهایت الاستیک یا ویسکو الاستیک با لایه‌بندی افقی تشکیل شده که روی یک سنگ‌بستر صلب یا نیمه‌فضای نیمه‌بینهایت الاستیک یا ویسکو الاستیک قرار دارد. پروفیل خاک انتخاب شده برای تحلیل در شکل (۲) نشان داده شده است. این پروفیل خاک شامل چهار لایه بالایی، ده لایه اضافی با عمق متغیر به اضافه میراگرهای ویسکوز است که این ده لایه اضافی با

مختلف است که به مدل‌های وینکلر یا تیر بر بستر ارتجاعی مربوط می‌شود. این مدل‌ها اندرکنش خاک-سازه را به صورت حالت ساده شده استاتیکی وینکلر در فرمول‌های دینامیکی در نظر می‌گیرند. رفتار دینامیکی خاک روی فونداسیون توسط گروهی از فنرها و دمپرهای موازی در جهات افقی و عمودی در طول سطح فرض می‌شود [۱۲].

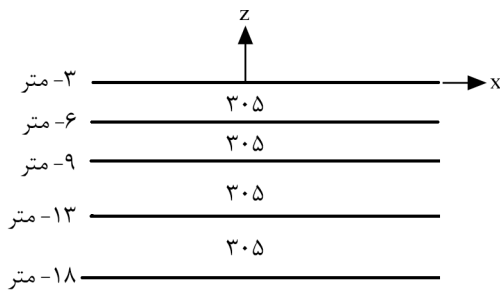
اخیراً مطالعات پارامتریک جامعی برای بررسی اثر SSI بر توزیع نیازهای شکل‌پذیری و عملکرد لرزه‌ای ساختمان-هایی که بر مبنای برش طراحی و بر مبنای الگوهای بار مختلف شامل الگوهای بار جانبی طراحی آیین‌نامه محور می‌باشند، انجام شده است. اثر بسیاری از پارامترها شامل پیوند اصلی، میزان رفتار غیرالاستیک، تعداد طبقات، مدل میرایی، نسبت میرایی، سخت‌شوندگی کرنش سازه‌ای، تحریک زلزله و میزان انعطاف‌پذیری خاک به صورت گسترده‌ای بررسی شده است. یکی از این تحقیقات توسط گنجوی [۱۴] در سال ۲۰۱۲ انجام شده است. همچنین روش‌هایی برای محاسبه میرایی، زمان تناوب سازه‌های شمعی و بیشترین نیروی برشی به همراه تغییر مکان پایه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه توسط محققین به همراه نمودارهایی ارائه شده است [۱۵].

از جمله روش‌های پیشنهادی برای زمانی که رفتار غیرخطی خاک مد نظر قرار گرفته می‌شود روش لایه‌های مجزا (PMDL) است. در این روش تابش انرژی به محیط بی‌نهایت خاک در نظر گرفته می‌شود و فرمول‌بندی در حوزه زمان ارائه می‌گردد [۱۶].

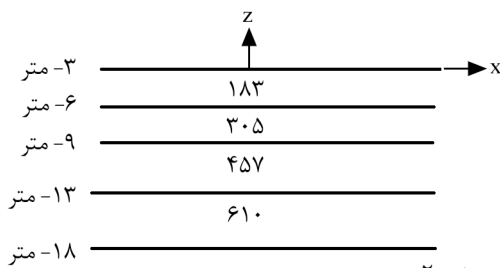
۲- بررسی پارامترهای موجود

سازه مد نظر، یک (Pressurized Water Reactor) PWR است؛ یعنی رآکتوری که فشار هوای داخل آن به وسیله آب تنظیم و روی یک نیم فضا با میرایی یکنواخت قرار دارد. کل سیستم رو سازه و پی در معرض انتشار عمودی موج‌های لرزه‌ای همراه با حرکت کنترلی مشخص در سطح زمین قرار می‌گیرند. هندسه سازه مورد نظر در شکل (۱) نشان داده

برابر سرعت موج برشی (V_s) در نظر گرفته شده است، یعنی $V_p = 2 V_s$. سه نوع خاک فقط در اندازه سرعت موج برشی و فشاری با هم تفاوت دارند.

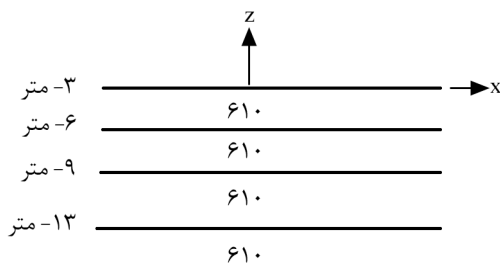


نوع ۱: $V_s = 305$ متر بر ثانیه و $V_p = 610$ متر بر ثانیه



نوع ۲:

$V_s = 183$ متر بر ثانیه و $V_p = 366$ متر بر ثانیه
 $V_s = 305$ متر بر ثانیه و $V_p = 610$ متر بر ثانیه
 $V_s = 457$ متر بر ثانیه و $V_p = 914$ متر بر ثانیه
 $V_s = 610$ متر بر ثانیه و $V_p = 1220$ متر بر ثانیه



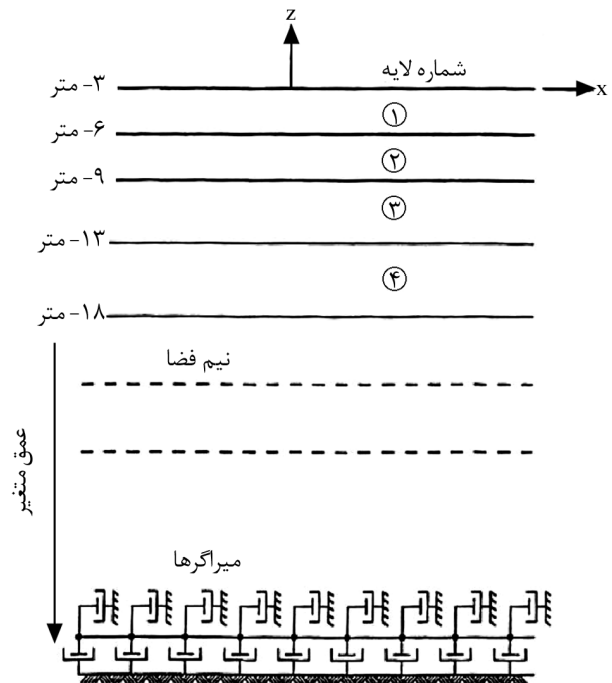
نوع ۱: $V_s = 610$ متر بر ثانیه و $V_p = 1220$ متر بر ثانیه

شکل (۳): پروفیل مربوط به هر سه نوع خاک.

۲-۲- مدل سازی سازه

شکل (۴)، مدل اجزای محدود مربوط به سازه مورد استفاده در تحلیل را نشان می‌دهد. این سازه شامل پی و رو سازه می‌باشد و رو سازه از دو قسمت داخلی و نگهدارنده (بیرونی) تشکیل شده است. باید به این نکته توجه داشت مصالح در نظر گرفته شده برای رو سازه و پی، بتن است و مدول الاستیک، مدول برشی و جرم داده شده به نرم افزار مربوط به بتن می‌باشد.

میراگرهایی که با اختیار کاربر اضافه می‌شوند، برای شبیه سازی نیم فضای نیمه بینهایت است. در اینجا برای شبیه سازی نیم فضا از روش عمق متغیر با ده لایه استفاده می‌شود، یعنی ارتفاع این لایه‌ها با افزایش عمق زیاد می‌شود و ارتفاع کلی این ده لایه برابر با $1/5\lambda$ است که $\lambda = V_s/f$ طول موج برشی در نیم فضا می‌باشد که تابعی از فرکانس تحلیل و سرعت موج برشی است البته این شبیه سازی با انتخاب کاربر توسط نرم افزار انجام می‌شود.



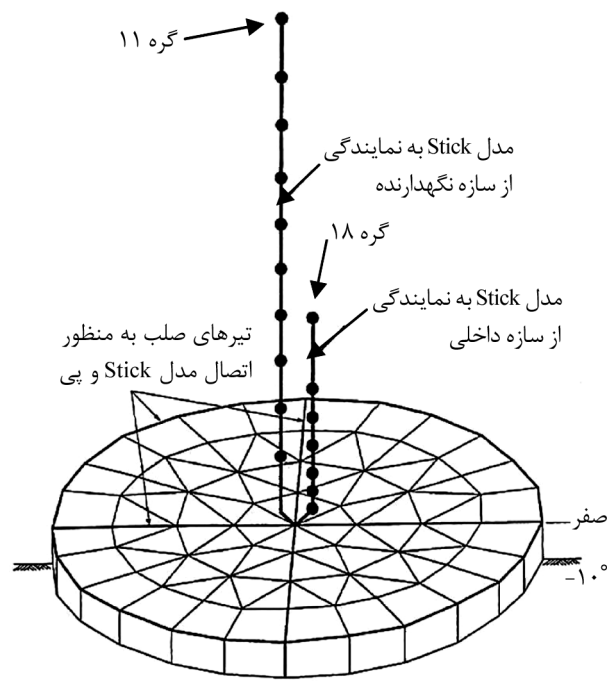
شکل (۴): پروفیل خاک انتخاب شده برای این تحلیل.

برای تحلیل، سه نوع خاک در نظر گرفته شده که تفاوت موجود در سختی آن‌ها است. با توجه به اینکه سختی رابطه مستقیم با مدول برشی و مدول برشی نیز ارتباط رادیکالی با سرعت موج برشی دارد، در این تحلیل با تغییر در سرعت موج، سختی خاک باید تغییر کند. پروفیل مربوط به هر سه نوع خاک در شکل (۳) نشان داده شده است.

باید توجه داشت که با توجه به رابطه $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ ، سختی متوسط خاک نوع ۲، $1/7$ برابر خاک نوع ۱ و سختی خاک نوع ۳، چهار برابر خاک نوع ۱ می‌باشد؛ که ρ چگالی خاک و V_p سرعت موج فشاری می‌باشد که در تحلیل دو



شکل (۵): مدل اجزا محدود Stick مربوط به رو سازه.



شکل (۴): مدل اجزا محدود مربوط به سازه (رو سازه و پی).

برای رو سازه و پی یک میرایی بحرانی یکنواخت ۲

درصد در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱): خواص سازه‌های مربوط به اعضای رو سازه.

خواص اجزاء (میلها)				خواص جرم‌ها	
ممان اینرسی (m ⁴)	سطح برشی (m ²)	سطح (m ²)	موقعیت با استفاده از شماره گره	Mig جرم مؤثر KN/(m ² *g)	شماره جرم
				۱۳۶۰۰۰۰۰	پایه
۲۴۱۷۶	۶۴	۱۳۰	پایه تا ۱	۳۱۲۸۰۰۰	۱
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۲-۱	۲۸۵۶۰۰۰	۲
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۳-۲	۲۸۵۶۰۰۰	۳
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۴-۳	۲۸۵۶۰۰۰	۴
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۵-۴	۲۸۵۶۰۰۰	۵
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۶-۵	۲۸۵۶۰۰۰	۶
۲۴۱۶۷	۶۴	۱۳۰	۷-۶	۳۱۳۴۸۰۰	۷
۱۶۳۹۹	۴۶	۹۲	۸-۷	۲۰۵۳۶۰۰	۸
۱۲۹۴۶	۴۶	۹۲	۹-۸	۱۶۷۹۶۰۰	۹
۶۹۰۵	۴۶	۹۲	۱۰-۹	۱۴۴۱۶۰۰	۱۰
۱۷۲۶	۴۶	۹۲	۱۱-۱۰	۱۲۹۲۰۰	۱۱
۹۴۹۴	۱۲۲	۱۸۶	۱۲-۱۱	۱۹۰۴۰۰۰	۱۲
۱۰۳۵۷	۱۴۵	۲۳۷	۱۳-۱۲	۱۷۰۶۸۰۰	۱۳
۱۰۳۵۷	۱۳۶	۲۰۵	۱۴-۱۳	۴۲۷۷۲۰۰	۱۴
۱۱۲۲۰	۶۸	۱۸۲	۱۵-۱۴	۲۵۵۶۸۰۰	۱۵
۷۷۶۸	۵۶	۱۶۲	۱۶-۱۵	۵۸۰۷۲۰۰	۱۶
۱۷۲۶	۳۳	۷۲	۱۷-۱۶	۸۲۹۶۰۰	۱۷
۳۴	۷	۱۸	۱۸-۱۷	۵۵۷۶۰۰	۱۸

۲-۲-۱- مدل سازی رو سازه

از مدل جرم توده‌ای (lumped-mass stick models)

برای رو سازه استفاده شده است که در این مدل از ۱۱ جرم متمرکز و توده‌ای برای سازه نگهدارنده (بیرونی) و ۷ جرم متمرکز و توده‌ای برای سازه داخلی و ۱۸ عضو تیر (beam) استفاده شده است. ۱۸ عضو تیر، ۱۸ جرم متمرکز را به یکدیگر و به پی متصل می‌کند، شکل (۵). ۱۸ جرم متمرکز در ارتفاعات مختلف در نظر گرفته می‌شود و مقدار جرمی که برای هرکدام از جرم‌های توده‌ای در نظر گرفته می‌شود معادل جرم سازه در محدوده ارتفاعی همان جرم توده‌ای است. برای ۱۸ عضو تیر هم به همین صورت، یعنی خواص سازه‌ای که برای هرکدام از اعضا در نظر گرفته می‌شود معادل خواص سازه‌ای در محدوده ارتفاعی همان عضو در سرتاسر سازه می‌باشد مانند سطح و سطح برشی و ممان اینرسی. خواص مربوط به مدل (۱۸ جرم متمرکز و ۱۸ عضو تیر) در جدول (۱) نشان داده شده است.

هر یک از سه نمونه سازه مشخص شده در شکل (۷)، به‌طور مجزا با سه نوع خاک (باز هم به‌صورت مجزا) مدل می‌شوند، در نتیجه در مجموع ۹ سیستم خاک-سازه‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳- مدلسازی خاک حفاری شده

برای تحلیل سازه‌های مدفون در نرم‌افزار SASSI، باید خاک حفاری شده مدل شود؛ یعنی ناحیه‌ای که حفاری شده و پی در آن قرار می‌گیرد در اینجا مدلی که برابرجم خاک حفاری شده در نظر گرفته می‌شود دقیقاً همان مدلی است که برای پی استفاده می‌شود یعنی از همان تعداد اجزا Solid و با همان اندازه و شماره‌گذاری اجزا و گره‌ها و باید توجه داشت که سازه نمونه ۱ دارای پی سطحی است و خاک حفاری شده ندارد ولی برای نمونه‌های ۲ و ۳ خاک حفاری شده مدل می‌شود که مدل خاک حفاری شده برای سازه نمونه ۲ در شکل (۸) آمده است.

۳- حرکت کنترلی

برای تحلیل، دو حرکت کنترلی در نظر گرفته می‌شود که در ذیل به آن اشاره می‌شود.

۳-۱- حرکت کنترلی «ال سنتر»

اولین حرکت کنترلی نسخه مقیاس شده از مؤلفه NS، زلزله «ال سنتر» است که نمودار رکورد شتاب مربوط به این حرکت در شکل (۹) نشان داده می‌شود. این حرکت کنترلی، به بیش‌ترین شتاب ۰/۱g مقیاس شده و مدت‌زمان حرکت کنترلی ۱۰/۲۴ ثانیه است که در بازه‌های زمانی ۰/۰۵ ثانیه شتاب‌ها مشخص شده‌اند. طیف پاسخ شتاب متناظر در میرایی ۲ درصد در شکل (۹) نشان داده شده است.

۳-۲- حرکت کنترلی «طیس»

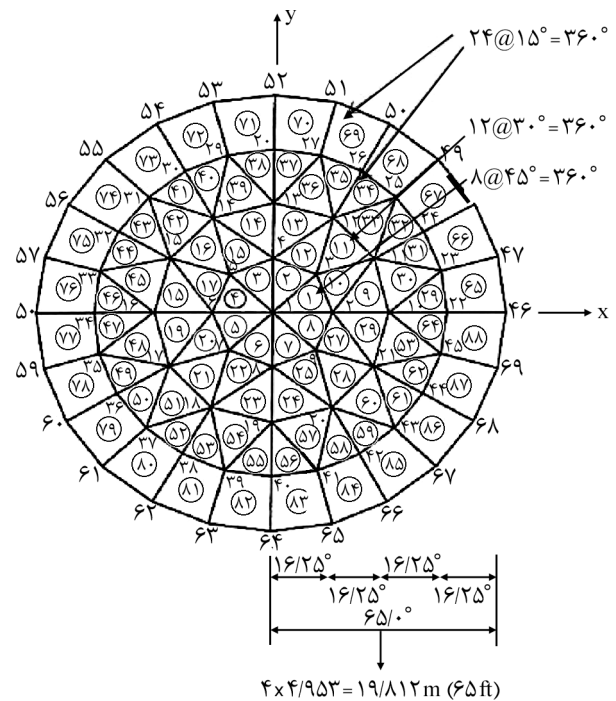
دومین حرکت کنترلی یک نگاهشت مقیاس شده از زلزله «طیس» در ایستگاه فردوس است. حرکت به بیش‌ترین شتاب ۰/۱g مقیاس شده و مدت‌زمان حرکت کنترلی ۳۹/۹۸ ثانیه می‌باشد که در بازه‌های زمانی ۰/۰۲ ثانیه شتاب‌ها مشخص شده‌اند.

مدول الاستیسیته بتن برابر 330×10^8 پاسکال و مدول برشی آن برابر 130×10^8 پاسکال فرض شده است.

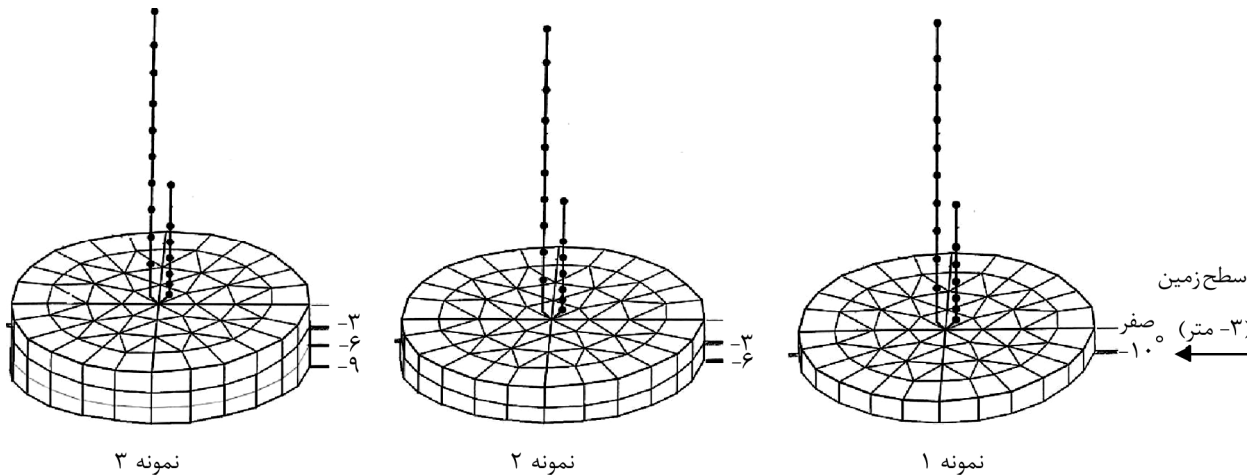
۲-۲- مدل کردن پی

در تحلیل، به دلیل ثابت بودن رو سازه در مجموع سه نمونه سازه با ارتفاع پی‌های مختلف وجود دارد. اولین نمونه، پی سطحی است که مدفون نبوده و روی زمین با ارتفاع ۳ متر قرار دارد. دومین نمونه، پی دو لایه که یک لایه آن بالای سطح زمین و لایه دیگر در زیر زمین قرار دارد که به هم متصل و ارتفاع هر لایه ۳ متر است. نمونه سوم، مدل پی سه لایه که یک لایه روی زمین و دو لایه دیگر به ارتفاع ۶ متر زیر زمین قرار دارد. کل ارتفاع پی ۹ متر است و در واقع پی نمونه دوم و سوم مدفون هستند.

برای مدل کردن پی از اجزای ۸ گرهی Solid (Brick) استفاده می‌شود. هر لایه از پی نیز از ۸۸ جزء Solid تشکیل شده که هرکدام از سطوح بالایی و پایینی در مجموع با ۶۹ گره به لایه بعدی و یا خاک زیر پی متصل می‌شوند. شکل ظاهری و مشخصات هندسی هر لایه از پی در شکل (۶) مشخص شده است.



شکل (۶): شکل ظاهری و مشخصات هندسی هر لایه از پی.

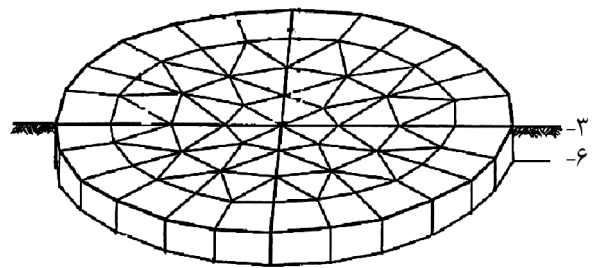


شکل (۷): سه نمونه سازه (با پی‌های متفاوت و رو سازه ثابت).

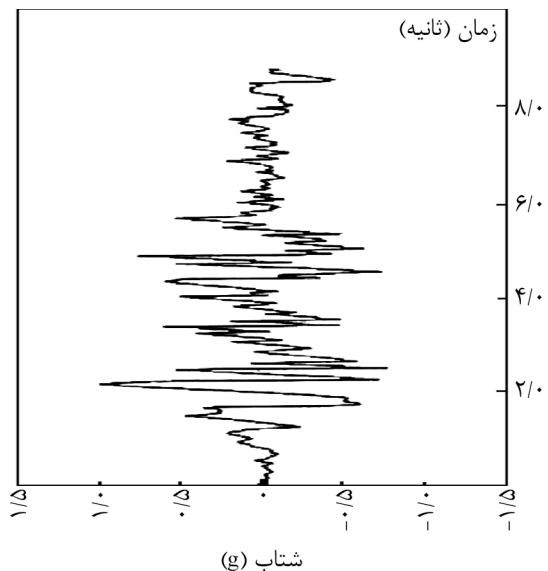
کنترلی «ال سنتر» و «طبس» به صورت مجزا انجام می‌شود. اثرات هر کدام از این موج‌ها بر روی سه نمونه پی و سه نوع خاک بررسی می‌شود و این که با مدفون شدن پی و تغییر در ارتفاع پی، پاسخ‌ها در برابر موج‌های زلزله چه مقدار تغییر می‌کند و در واقع یافتن این نکته که برای هر نوع پی بیش‌ترین و کم‌ترین پاسخ‌ها در سازه در برابر کدام نوع موج خواهد بود و در این میان نیز تأثیر افزایش سختی خاک (افزایش سرعت موج) بر روی پاسخ‌های هر سه نمونه سازه در برابر هر کدام از این دو موج بررسی می‌شود. SASSI نرم‌افزاری است که تحلیل را در حوزه فرکانس انجام می‌دهد و از اصل جمع آثار قوا استفاده می‌کند بنابراین تحلیل باید خطی باشد ولی می‌توان تحلیل‌های غیرخطی تقریبی را نیز با روشی انجام داد که روش خطی معادل نامیده می‌شود.

۴-۱- فرکانس‌های تحلیل

فرکانس‌های تحلیل مسأله از تحلیل سازه در حالت پایه ثابت و ارتعاش آزاد به دست می‌آیند. معمولاً معرفی ۱۰ تا ۲۰ فرکانس به نرم‌افزار برای تحلیل کافی است. نرم‌افزار در این فرکانس‌ها تحلیل را انجام می‌دهد و معادله حرکت اصلی را حل می‌کند و توابع انتقال تغییر شکل و تنش را با استفاده از تشکیل معادله امیدانس خاک حفاری‌شده، به دست می‌آورد. سپس با استفاده از روش عددی سریع فوریه،



شکل (۸): مدل خاک حفاری‌شده برای سازه نمونه ۲.



شکل (۹): نمودار رکورد شتاب مربوط به زلزله "ال سنتر" ۱۹۴۰.

۴-۲- تحلیل اندرکنشی مدل‌ها

در اینجا تحلیل اندرکنشی کل سیستم خاک-سازه در اثر چهار موج رایلی، لاو، فشاری P و برشی S و دو حرکت

ج- بالاترین گره مربوط به سازه نگهدارنده (بیرونی) رو سازه (گره شماره ۱۱ در شکل (۴)).

۵-۱- بررسی لرزه‌ای سازه در برابر زلزله «ال سنترو»

۹ نوع سازه در برابر چهار حالت موجی رایلی، لاو، فشاری P و برشی S به صورت مجزا تحلیل می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده (SASSI) این قابلیت را دارد که شتاب‌های ثبت شده مربوط به حرکت کنترلی را (به طور مثال رکورد ال سنترو) در قالب همه حالات موجی به طور مجزا و یا ترکیبی، به سیستم اعمال کند. در ادامه نتایج تحلیل برای چهار حالت موجی رایلی، لاو، فشاری P و برشی S به صورت مجزا در قالب نمودارهایی آورده شده است. برای به دست آوردن این نمودارها، هر نمونه سازه با سه نوع خاک به صورت مجزا مدل شده و هرکدام از این مدل‌ها به صورت جداگانه در برابر حرکت کنترلی در قالب هر چهار موج (باز هم به طور مجزا) تحلیل شده‌اند و برای هر نمونه، هر نوع خاک و هر حالت موجی، پاسخ‌های تاریخیچه زمانی شتاب (برابر با همان مدت زمان حرکت کنترلی) برای هر گره به صورت جداگانه به دست آمد و بیشترین پاسخ (شتاب) در گره‌ها انتخاب و در نمودارها قرار داده شد و در واقع اعدادی که در نمودارهای زیر استفاده شده، بیشینه پاسخ‌ها است.

۵-۱-۱- موج رایلی

پس از تحلیل کل سیستم در برابر موج رایلی (برای هر سه نوع خاک و هر سه نمونه پی به صورت مجزا)، پاسخ‌های تاریخیچه زمانی شتاب (برابر با همان مدت زمان حرکت کنترلی) مربوط به این سه گره به دست آمد و با استفاده از بیشینه این پاسخ‌های تاریخیچه زمانی شتاب برای هر گره، شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) به دست آمد.

در نمودارهای موجود محور افقی نوع خاک را نشان داده و در جهت مثبت نمودار، سختی خاک افزایش می‌یابد. همچنین داخل شکل، نمونه ۱ با پی سطحی و نمونه ۲ با پی مدفون و عمق مدفونی ۳ متر و نمونه ۳ با پی مدفون و عمق مدفونی ۶ متر می‌باشد. در این نمودارها به خوبی تأثیر تغییر در عمق مدفونی و سختی خاک مشاهده می‌شود.

تابع بارگذاری یا شتاب زمین را (حرکت کنترلی) بر حسب نسبت‌های معینی از فرکانس‌های مورد نظر به فرکانس غالب موج زلزله محاسبه می‌کند؛ لذا نرم‌افزار در تعداد بسیار بیشتری از ۱۰ فرکانس با استفاده از درون‌یابی بر حسب نقاط فرکانسی معلوم، توابع انتقالی را محاسبه می‌کند و پس از تلفیق نظیر به نظیر توابع انتقالی و حرکت کنترلی در فرکانس‌های به دست آمده، پاسخ‌های حقیقی درجات آزادی مختلف سیستم را در حوزه فرکانس به دست می‌آورد. چون در طی این فرآیند از تبدیل فوریه استفاده می‌شود، تعداد فرکانس‌های به دست آمده از درون‌یابی باید توانی از ۲ باشد (مثلاً ۱۰۲۴). در این مسأله پس از تحلیل پایه ثابت سازه، فرکانس‌های لازم برای تحلیل که تعداد آن ۱۳ است به دست آمده و در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مقادیر فرکانس‌های در نظر گرفته شده برای تحلیل (بر مبنای هرتز).

۰/۹۷	۲/۹۴	۴/۸۸	۵/۸۵	۷/۸۱	۹/۷۶	۱۱/۷۲
(هرتز)	۱۵/۶۳	۱۷/۵۸	۲۰/۵۱	۲۲/۴۶	۲۵/۳۹	

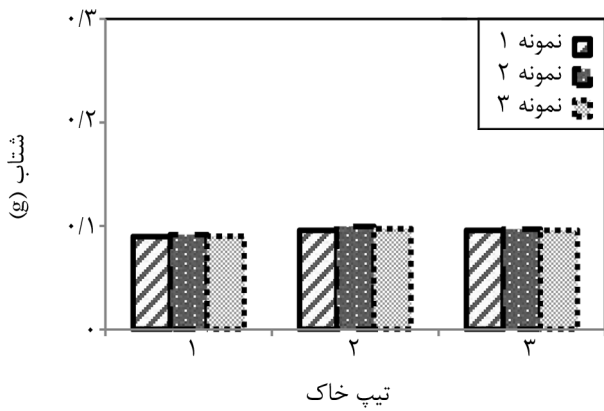
۵- بررسی لرزه‌ای مدل‌ها

بعد از مدل‌سازی سازه و خاک و تعیین کل مشخصات سیستم در نرم‌افزار و دادن فرکانس‌های تحلیل، تحلیل برای هر دو حرکت کنترلی به صورت مجزا انجام شده و برای هر حرکت کنترلی نیز سازه در برابر انواع موج‌های زلزله به صورت جداگانه تحلیل و نتایج مقایسه شده است. به دلیل تحلیل لرزه‌ای، خروجی‌های نرم‌افزار از نوع شتاب بوده و می‌توان پاسخ‌هایی از جنس شتاب را در تمام گره‌های اندرکنشی که برای سازه تعریف شده را به دست آورد. برای تحلیل و مقایسه بین نتایج، سه گره در رو سازه انتخاب شده که در ذیل به آن اشاره می‌شود:

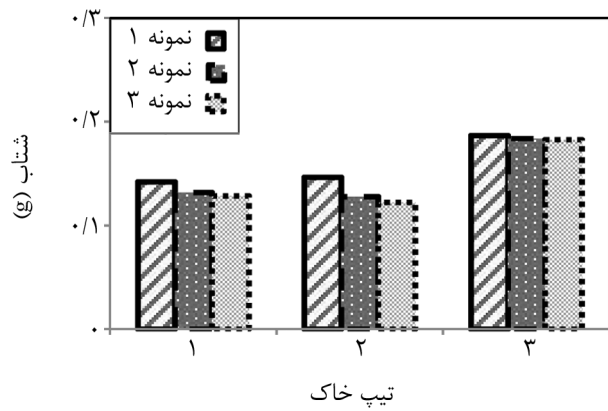
الف- گره در پایه سازه و روی سطح پی (گره base، یعنی پایین‌ترین گره)؛

ب- بالاترین گره مربوط به سازه داخلی رو سازه (گره

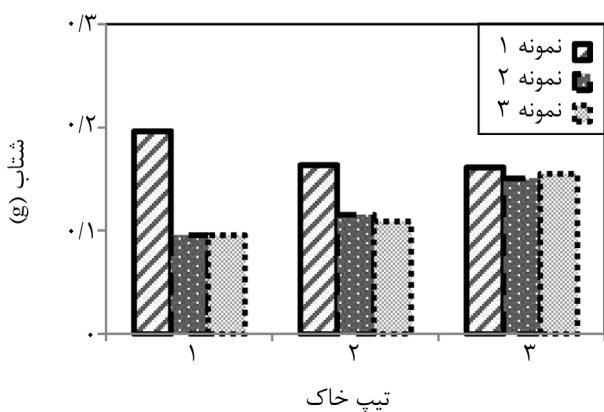
شماره ۱۸ در شکل (۴))؛



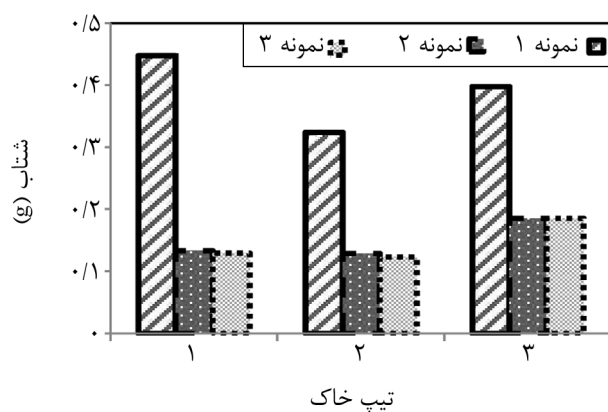
شکل (۱۳): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج لاو.



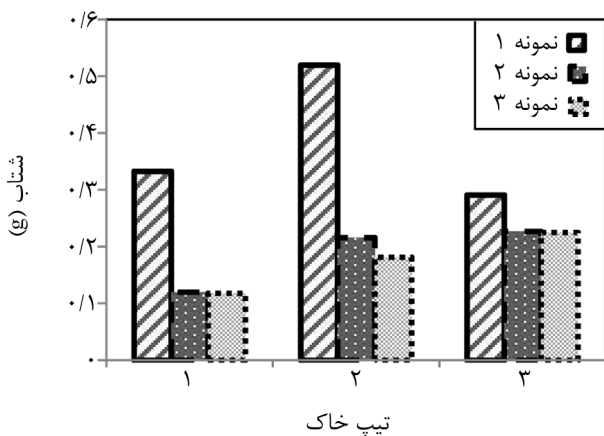
شکل (۱۰): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج رایلی.



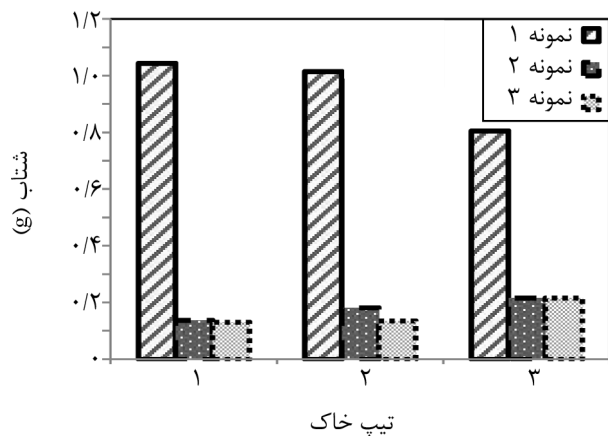
شکل (۱۴): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج لاو.



شکل (۱۱): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج رایلی.



شکل (۱۵): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج لاو.



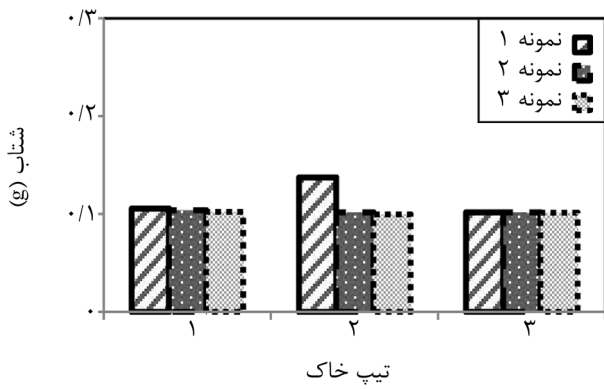
شکل (۱۲): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج رایلی.

۵-۱-۳- موج برشی S

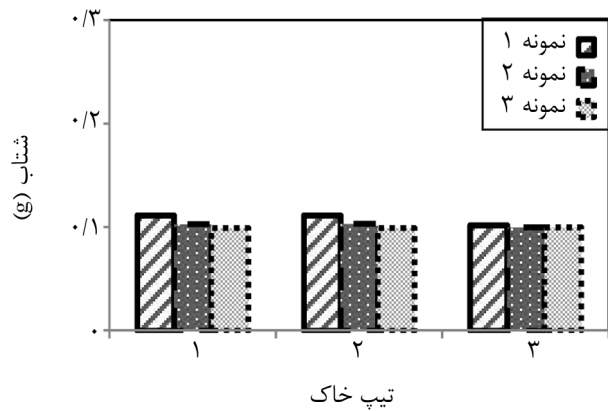
نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج برشی S (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است.

۵-۱-۲- موج لاو

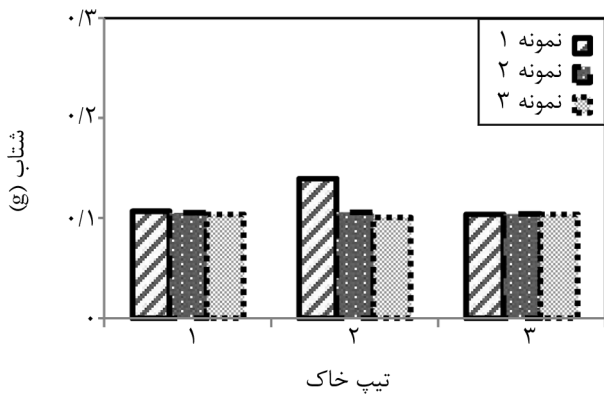
نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج لاو (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) نشان داده شده است.



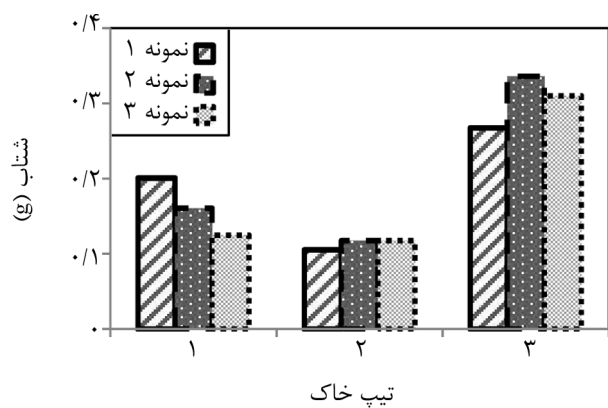
شکل (۱۹): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج برشی P.



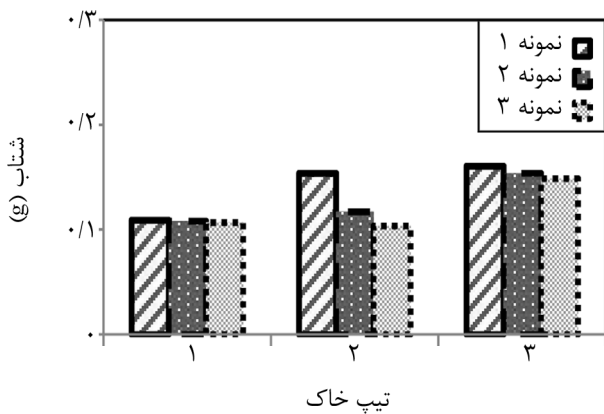
شکل (۱۶): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج برشی S.



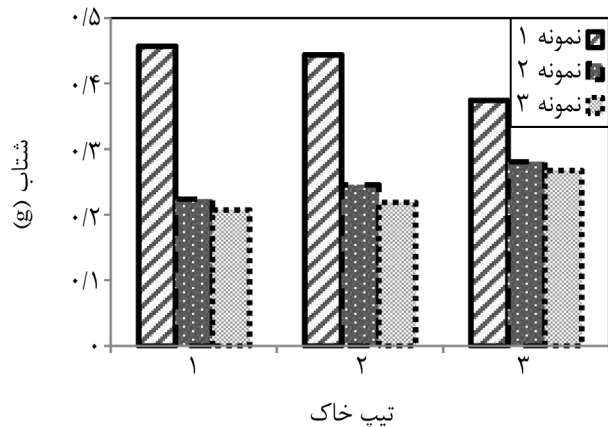
شکل (۲۰): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج برشی P.



شکل (۱۷): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج برشی S.



شکل (۲۱): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج برشی P.



شکل (۱۸): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج برشی S.

۵-۱-۵- نتایج بررسی حالات موجی زلزله «السترو»

با توجه به همه نمودارها، تأثیر افزایش ارتفاع پی با تبدیل پی سطحی به پی مدفون (تبدیل ارتفاع پی از ۳ به ۶ متر)، رابطه عکس داشته و پاسخها به طور میانگین حدود ۴۶ درصد کاهش یافته است (اختلاف بین نمونه ۱ و ۲).

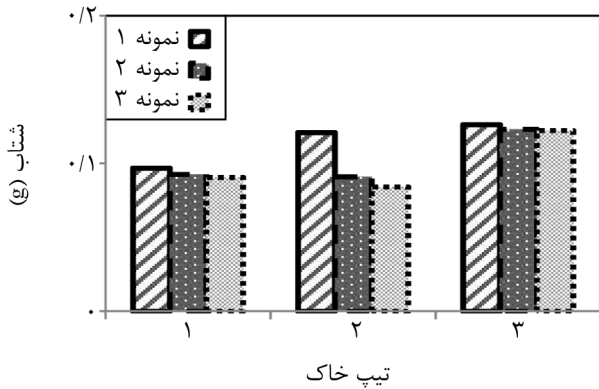
۵-۱-۴- موج فشاری P

نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج فشاری P (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) نشان داده شده است.

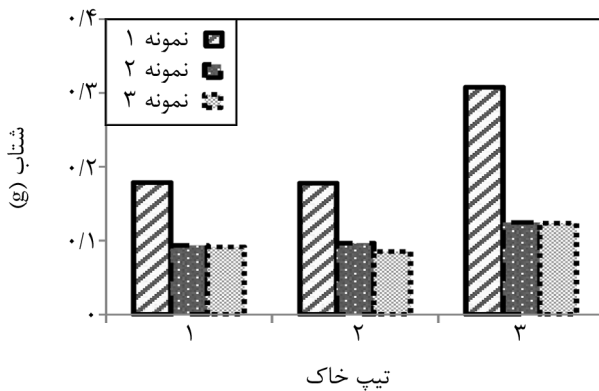
که در ادامه نتایج تحلیل بیان می‌شود.

۵-۲-۱- موج رایلی

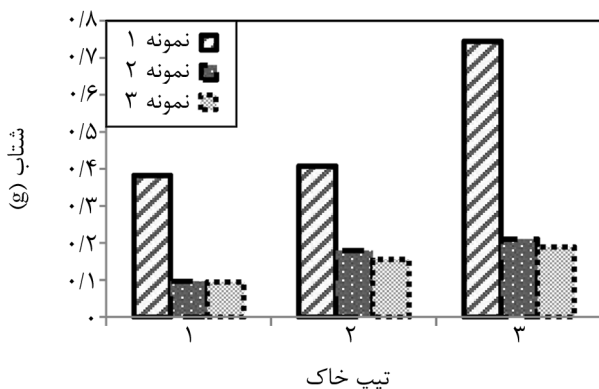
نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج رایلی (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) نشان داده شده است.



شکل (۲۲): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج رایلی.



شکل (۲۳): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج رایلی.



شکل (۲۴): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج رایلی.

با توجه به همه نمودارها، اختلاف زیادی بین پاسخ‌های دو نمونه مدفون (۲ و ۳)، وجود ندارد و نمودارها تقریباً روی هم هستند؛ یعنی افزایش ارتفاع مدفونی پی از ۳ به ۶ متر (تبدیل کل ارتفاع پی از ۶ به ۹ متر) تأثیر چشمگیری در کاهش پاسخ‌ها نداشته و به طور میانگین پاسخ‌ها حدود ۵ درصد کاهش دارد.

برای نمونه‌ی با پی سطحی (نمونه ۱)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) پاسخ‌ها حدود ۴ درصد کاهش یافتند.

برای دو نمونه‌ی با پی مدفون (نمونه‌های ۲ و ۳)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) پاسخ‌ها حدود ۲۰ درصد افزایش یافته‌اند.

برای نمونه ۱ با پی سطحی بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج رایلی بوده که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۱۵۸ درصد بیشتر است. کمترین پاسخ‌ها در برابر موج P بوده که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۶۲ درصد کمتر است.

برای دو نمونه‌ی با پی مدفون بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج S بوده که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۳۶ درصد بیشتر است. کمترین پاسخ‌ها در برابر موج P می‌باشد که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۲۹ درصد کمتر است.

بیش‌ترین اختلاف بین پاسخ‌های نمونه‌های مدفون و نمونه‌ی با پی سطحی در حالت موج رایلی است که با تبدیل پی مدفون به پی سطحی، پاسخ‌ها حدود ۲۲۵ درصد افزایش می‌یابند؛ یعنی اگر موج ناشی از زلزله رایلی باشد مدفون بودن پی در کاهش پاسخ‌ها بسیار مؤثر است.

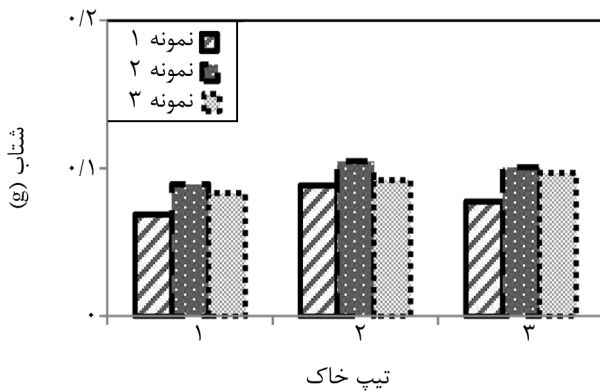
۵-۲- بررسی لرزه‌ای سازه در برابر زلزله «طبس»

در تحلیل حاضر، حرکت کنترلی که برای نرم‌افزار تعریف می‌شود شتاب‌های ثبت‌شده زلزله «طبس» است (رکورد «طبس») و این حرکت کنترلی توسط نرم‌افزار در قالب هر چهار حالت موجی به صورت مجزا، به ۹ نوع سازه اعمال شده

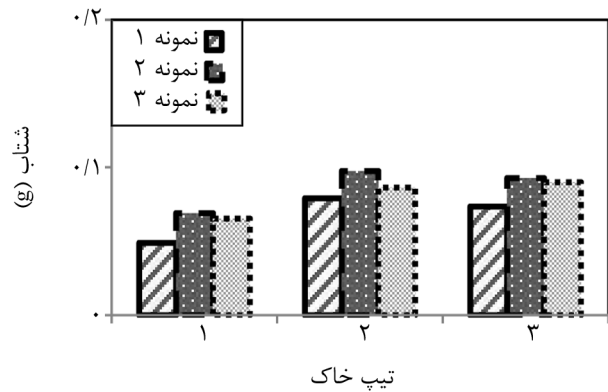
۵-۲-۲- موج لاو

در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) نشان داده شده است.

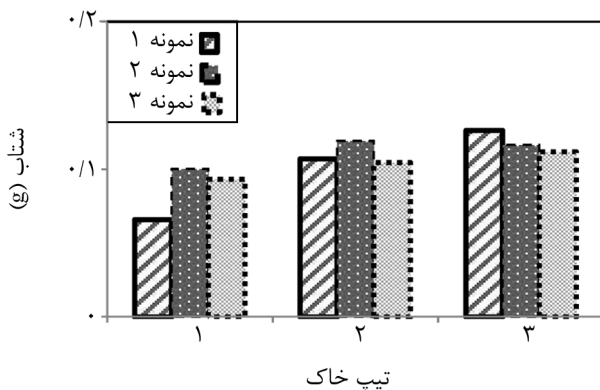
نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج لاو (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره در شکل‌های (۲۵) الی (۲۷) نشان داده شده است.



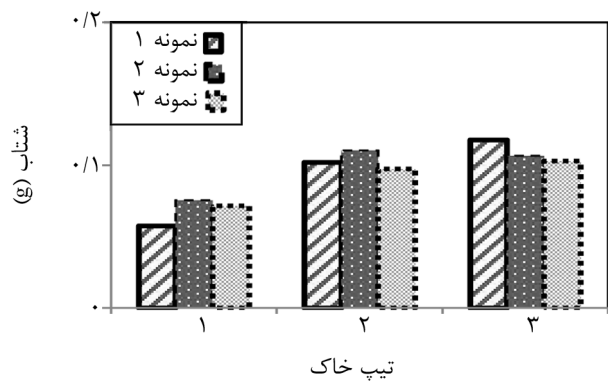
شکل (۲۸): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج برشی S.



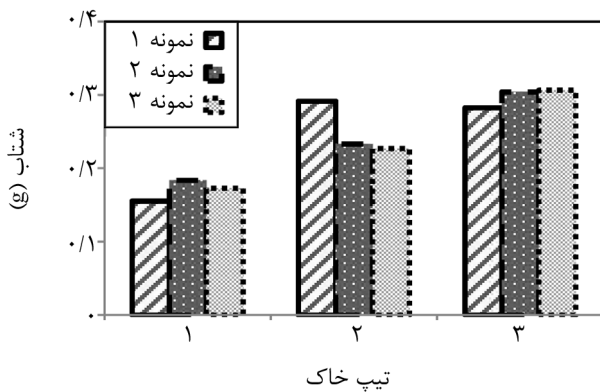
شکل (۲۵): نتایج تحلیل در گره «پایه» برای موج لاو.



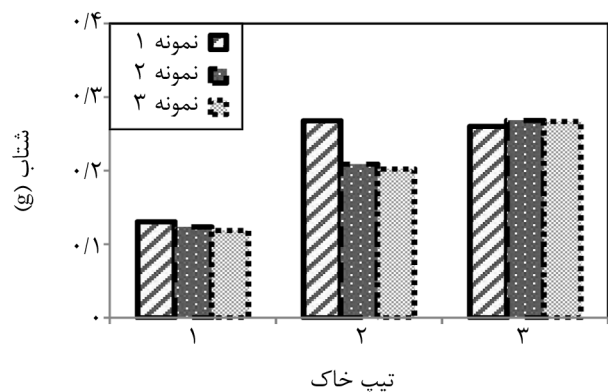
شکل (۲۹): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج برشی S.



شکل (۲۶): نتایج در گره «بالایی داخلی» برای موج لاو.



شکل (۳۰): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج برشی S.



شکل (۲۷): نتایج در گره «بالایی بیرونی» برای موج لاو.

۵-۲-۴- موج فشاری P

نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج فشاری P (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا) با توجه به مشابهت نمودارها برای هر سه گره مورد نظر، در شکل (۳۱) نشان داده شده است.

۵-۲-۳- موج برشی S

نتایج تحلیل کل سیستم در برابر موج برشی S (برای هر سه نوع خاک و نمونه پی به صورت مجزا)، مربوط به سه گره

حدود ۳۲ درصد بیشتر می‌باشد. کمترین پاسخ‌ها در برابر موج P است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۲۸ درصد کم‌تر می‌باشد.

بیش‌ترین اختلاف بین پاسخ‌های نمونه‌های مدفون و نمونه با پی سطحی در حالت موج رایلی است که این اختلاف حدود ۱۳۹ درصد می‌باشد؛ یعنی اگر موج ناشی از زلزله رایلی باشد مدفون بودن پی در کاهش پاسخ‌ها بسیار مؤثر است.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای مربوط به هر دو حرکت کنترلی، تأثیر افزایش ارتفاع پی با تبدیل شدن پی سطحی به پی مدفون (تبدیل ارتفاع پی از ۳ به ۶ متر) رابطه معکوس داشته و به‌طور میانگین پاسخ‌ها حدود ۳۸ درصد کاهش یافته است (اختلاف بین نمونه‌های ۱ و ۲).

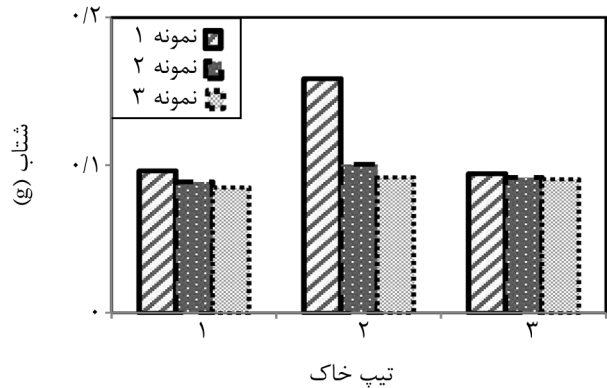
با توجه به همه نمودارها، بین پاسخ‌های دو نمونه مدفون (۲ و ۳)، اختلاف زیادی وجود نداشته و نمودارها تقریباً روی هم هستند؛ یعنی افزایش ارتفاع مدفونی پی از ۳ به ۶ متر (تبدیل کل ارتفاع پی از ۶ به ۹ متر) تأثیر چشمگیری در کاهش پاسخ‌ها نداشته و به‌طور میانگین پاسخ‌ها حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

برای نمونه با پی سطحی (نمونه ۱)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) پاسخ‌ها حدود ۷ درصد افزایش یافتند.

برای دو نمونه با پی مدفون (نمونه‌های ۲ و ۳)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) پاسخ‌ها حدود ۲۰ درصد افزایش یافتند.

با توجه به دو مورد ج و د، تأثیر افزایش سختی بر روی پاسخ‌ها، در دو نمونه با پی مدفون (۲ و ۳) بیش‌تر از نمونه با پی سطحی (۱) می‌باشد.

برای نمونه با پی سطحی (نمونه ۱) بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج رایلی است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۱۴۳ درصد بیشتر می‌باشد. کم‌ترین پاسخ‌ها



شکل (۳۱): نتایج در هر سه گره مورد نظر برای موج فشاری P.

۵-۲-۵- نتایج بررسی حالات موجی زلزله «طبی»

با توجه به همه نمودارها، تأثیر افزایش ارتفاع پی با تبدیل پی سطحی به پی مدفون (تبدیل ارتفاع پی از ۳ متر به ۶ متر)، رابطه عکس داشته و به‌طور میانگین پاسخ‌ها حدود ۲۶ درصد کاهش یافته است (اختلاف بین نمونه ۱ و ۲).

با توجه به همه نمودارها، بین پاسخ‌های دو نمونه مدفون (۲ و ۳)، اختلاف زیادی وجود داشته و تقریباً نمودارها روی هم می‌باشند؛ یعنی افزایش ارتفاع مدفونی پی از ۳ به ۶ متر (تبدیل کل ارتفاع پی از ۶ به ۹ متر) تأثیر چشمگیری در کاهش پاسخ‌ها نداشته و به‌طور میانگین پاسخ‌ها حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

برای نمونه با پی سطحی (نمونه ۱)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) برخلاف حرکت کنترلی «ال سنتر» پاسخ‌ها حدود ۳۰ درصد افزایش یافتند.

برای دو نمونه با پی مدفون (نمونه‌های ۲ و ۳)، با افزایش سختی خاک (تبدیل خاک نوع ۱ به نوع ۲ و ۳) پاسخ‌ها حدود ۲۲ درصد افزایش یافتند.

برای نمونه با پی سطحی (نمونه ۱) بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج رایلی بوده که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۱۲۰ درصد بیش‌تر است. کم‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج P است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۳۵ درصد کم‌تر می‌باشد.

برای دو نمونه با پی مدفون بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج S است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی

- Seismological Society of America*, **71**(6), 1743 - 1761.
7. Wass, G. (1972) Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layer media. Ph.D. Thesis, University of California Berkeley.
 8. Abrahamson, N.A. and Litehiser, J.J. (1989) Attenuation of vertical peak acceleration. *Bulletin of the seismological society of America*, **79**(3), 549-580.
 9. Luco, J.E., Wong, H.L., and Trifunac, M.D. (1975) A note on the dynamic response of rigid embedded foundations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **4**(2), 119-127.
 10. Wolf, J.P. (1997) Spring-Dashpot-Mass models for foundation vibrations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(9), 931-949.
۱۱. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (۱۳۸۵) سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی، نشریه ۳۶۰، فصل ۴، بخش ۴-۴.
12. Julio, M.I. and Garcia, A. (2001) Reduction of seismically induced structural vibrations considering soil-structure interaction. Ph.D. Thesis, El Salvador.
 13. Su, J. and Wang, Y. (2013) Equivalent dynamic infinite element for soil-structure interaction. *Finite Elements in Analysis and Design*, **63**, 1-7.
 14. Ganjavi, B. and Hao, H. (2012) A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects. *Engineering Structures*, **43**, 88-104
 15. Medina, C. and Aznera, J.J. (2013) Effects of soil-structure interaction on the dynamic properties and seismic response of piled structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **53**, 160-175.
 16. Lee, J.H. and Kim, J.K., and Kim, J.H. (2014) Nonlinear analysis of soil-structure interaction using perfectly matched discrete layers. *Computers and Structures*, **142**, 28-44.
- در برابر موج P است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۵۲ درصد کمتر می‌باشد.
- برای دو نمونه با پی مدفون بیش‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج S است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۳۴ درصد بیش‌تر می‌باشد. کم‌ترین پاسخ‌ها در برابر موج P است که نسبت به میانگین بقیه حالات موجی حدود ۲۹ درصد کم‌تر می‌باشد.
- بیش‌ترین اختلاف بین پاسخ‌های نمونه‌های با پی مدفون (۲ و ۳) و نمونه با پی سطحی (۱)، در حالت موج راییلی است که این اختلاف حدود ۱۸۷ درصد می‌باشد؛ یعنی اگر موج ناشی از زلزله راییلی باشد، مدفون بودن پی در کاهش پاسخ‌ها بسیار مؤثر است.

مراجع

1. Campbell, K.W. (1985) Strong motion attenuation; a ten- year perspective. *Earthquake Spectra*, **1**(4), 759-804.
2. Dahle, A., Bungum, H., and Kvamme, L.F. (1990) Attenuation models inferred from intraplate earthquake recordings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**(8), 1125-1148.
3. Celebi, M. (1995) Northridge (California) Earthquake unique Ground motions and resulting. Spectral and site effects Proceedings. *5th International conference on seismic zonation EERI-AFPS*, Nice.
4. Cardenas, M., Bard, P.Y., Chavez-Garcia, F.J., and Gueguen, P. (1999) Modélisation des fonctions d'impédance pour une etude d'interaction sol-structure. Application des modèles de cone, *5th National Conference of the AFPS*, Cachon.
5. Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Tajrian, F., and Vahdani, Sh. (2000) Theoretical and user manual of the computer program «SASSI» for the analysis of SSI was developed in the university of California, Berkeley.
6. Kausel, E. and Roesset, J. (1981) Stiffness matrices for layers soils. *Bulletin of the*