

ارزیابی اثرات اندرکنش خاک-سازه برای ساختمان‌های بلندمرتبه بر روی خاک لایه‌ای (مطالعه موردی)

میتراباباجانی^۱، محمد شریفی پور^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

چکیده

افزایش روزافزون ساخت سازه‌های بلندمرتبه در شهرها و قرارگیری ساختمان‌ها بر روی خاک‌هایی با لایه‌بندی متفاوت، ضرورت توجه مهندسان به تأثیر شرایط مختلف لایه‌های خاک بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را بیش‌ازپیش نمایان می‌کند. در این مطالعه پس از صحت‌سنجی مدل عددی سه‌بعدی با استفاده از آزمایش میز لرزان قبلی، تأثیر لایه‌بندی خاک بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مقاوم با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (SSI) موردبررسی قرار گرفته است. با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس، مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های عددی برای یک ساختمان ۱۵ طبقه قرارگرفته بر روی خاک لایه‌ای با مقادیر مختلف سرعت موج برشی شبیه‌سازی شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت حرکت لرزه‌ای به روش مستقیم انجام شده و نتایج از نظر حداکثر تغییر مکان جانبی، نیروی برشی، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و طیف پاسخ شتاب مقایسه و موردبحث قرار گرفته است. نتایج نشان داد هرچه لایه خاک با سرعت موج برشی کمتر، عمق بیشتری داشته و به سطح زمین نزدیک‌تر باشد، مقادیر تغییر مکان جانبی و نیروی برشی، جابه‌جایی نسبی طبقات و طیف پاسخ شتاب بیشتر است. همچنین طبق نتایج، لایه‌بندی خاک سهم عمده‌ای در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها با در نظرگیری SSI دارد و در نظر گرفتن SSI موجب اطمینان از طراحی ایمن و اقتصادی سازه‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، مدل‌سازی عددی، خاک نرم، آباکوس، جابه‌جایی نسبی، برش طبقه

* نویسنده مسئول: محمد شریفی پور

پست الکترونیکی: Sharifipour@razi.ac.ir

۱- مقدمه

هنگامی که یک پی تحت تأثیر ماشین‌های ارتعاشی یا یک رویداد لرزه‌ای است، جابه‌جایی سازه و جابه‌جایی زمین، مستقل از یکدیگر نیستند. این روند وابستگی متقابل پاسخ‌های سازه و خاک به‌عنوان اندرکنش خاک و سازه^۱ نامیده می‌شود.

اندرکنش بین خاک و سازه یک زمینه بین‌رشته‌ای است که در تقاطع مکانیک خاک و سازه، دینامیک خاک و سازه، مهندسی زلزله، ژئوفیزیک و ژئومکانیک، علوم مواد، روش‌های محاسباتی و عددی و سایر رشته‌های مختلف فنی قرار دارد [۱].

اندرکنش خاک-سازه برای در نظر گرفتن پاسخ لرزه‌ای یک سازه کاربرد دارد و نادیده گرفتن آن منجر به طراحی محافظه‌کارانه می‌شود. همچنین مشاهدات حاصل از برخی وقایع لرزه‌ای گذشته، شواهدی از ماهیت مخرب SSI را در شرایط خاص نشان می‌دهد.

در نظر گرفتن SSI باعث انعطاف‌پذیری سازه، افزایش پریود طبیعی و افزایش نسبت میرایی مؤثر آن می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده کاهش تقاضای برشی پایه برای یک سازه در مقایسه با نمونه پایه گیردار آن است. علی‌رغم چنین پیش‌فرض‌هایی، معمولاً این اندرکنش توسط طراحان نادیده گرفته می‌شود [۲].

تاکنون مطالعات پارامتری زیادی برای اثبات اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در طراحی سازه انجام شده است. اکثر آن‌ها وضعیت سازه، مشخصات زیربنایی، مدول خاک و مشخصات سرعت موج برشی را در رسوب‌های طبقه‌بندی‌شده عنوان می‌کنند که بر پاسخ لرزه‌ای آن‌ها تأثیر می‌گذارد [۲].

در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه جهت تعیین نیروی لرزه‌ای سازه و به‌تبع آن کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی حائز اهمیت است. لذا شناخت رفتار واقعی مصالح در این میان مورد توجه محققین و مهندسين بسیاری بوده است [۳].

یافته‌ها نشان می‌دهد که سازه‌ها با پی‌های سطحی در خاک‌های بسیار نرم، کاهش تلفات ناشی از SSI را تجربه می‌کنند؛ درحالی‌که وجود خاک‌های نرم و متوسط منجر به افزایش احتمال اثرات مخرب SSI می‌شود [۴].

تحریک لرزه‌ای که توسط سازه‌ها تجربه می‌شود، تابعی از ویژگی‌های زمین‌لرزه، اثرات مسیر حرکت موج، اثرات سایت محلی و اثرات اندرکنش خاک و سازه است. نتیجه سه عامل اول را می‌توان به‌عنوان حرکت زمین «میدان آزاد» خلاصه کرد. در نتیجه، ارزیابی دقیق نیروهای اینرسی و جابه‌جایی در سازه نیاز به یک رفتار منطقی از اثرات SSI دارد [۵].

اهمیت طراحی مبتنی بر عملکرد لرزه‌ای در سازه‌های کوتاه تا میانی که بر روی پی‌های سطحی و خاک نرم با رفتار الاستوپلاستیک قرار گرفته است، نمود بیشتری پیدا می‌کند. همچنین نشان داده شده است که توصیف دقیق اندرکنش خاک و سازه موجب جلوگیری از وقایع خطرناکی مانند تشدید، حرکت گهواره‌ای پی و تقاضای برشی بیش‌ازحد می‌شود [۶].

بزرگی نیروهای لرزه‌ای القاشده در ساختمان در هنگام زلزله، به دوره طبیعی لرزش آن بستگی دارد. برای ساختمان‌هایی که بر روی خاک‌های نرم قرار دارند، سیستم پی-خاک انعطاف‌پذیری را در پایه ساختمان ایجاد می‌کند که توجه به اثرات SSI ضروری است. SSI نیروهای لرزه‌ای القاشده در ساختمان را تغییر می‌دهد که به تغییر در دوره طبیعی پایه گیردار آن بستگی دارد و افزایش در دوره طبیعی اساسی یک سازه نسبتاً انعطاف‌پذیر به دلیل SSI ممکن است در برخی از محیط‌های لرزه‌ای و خاک، تأثیر مخربی بر تقاضای لرزه‌ای تحمیل شده داشته باشد [۷ و ۸].

¹ Soil Structure Interaction (SSI)

تغییر مکان‌های جانبی بین طبقات ساختمان، با در نظر گرفتن SSI افزایش می‌یابد. این موضوع ممکن است در ارزیابی پاسخ سازه تحت حرکات لرزه‌ای ضعیف (حالات‌های حدی آسیب‌پذیری) مهم باشد و منجر به آسیب اولیه احتمالی سازه شود [۹].

در برخی مطالعات نشان داده شده است که در خاک انعطاف‌پذیر، جابه‌جایی کلی روبنا به مقدار قابل توجهی در مقایسه با سازه قرارگرفته بر روی یک خاک سخت و یا سازه در حالت پایه‌گیردار افزایش می‌یابد و زمین‌لرزه‌ها در مناطق با پوشش خاک رس به‌خوبی اثرات مخرب اندرکنش خاک و سازه را در چنین شرایطی نشان داده‌اند [۶، ۱۰ و ۱۱].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌تواند نتایج مهمی را در اثر زلزله‌های شدید به همراه داشته باشد و کمی‌سازی دقیق آن‌ها می‌تواند به یک موضوع مهم در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله تبدیل شود. یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل SSI، استفاده از روش مستقیم یا زیر سازه است [۱۲].

ولتسوس^۲ و همکاران (۱۹۷۴) در مطالعه‌ای به اثرات اندرکنش خاک و سازه بر روی پاسخ دینامیکی سازه‌های خطی، به‌عنوان سیستم‌های تک درجه آزادی، پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اندرکنش خاک و سازه به میزان قابل توجهی بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها تأثیر می‌گذارد و به‌طور کلی باید در طراحی موردتوجه قرار گیرد [۱۳].

فتاحی و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی اثرات شاخص شکل‌پذیری بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی متوسط که بر روی خاک نرم قرارگرفته‌اند و اثرات خصوصیات خاک بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مقاوم در برابر لنگر، از روش تفاضل محدود استفاده کردند. بر اساس نتایج ارائه شده، با در نظر گرفتن ۳۰ متر خاک مشخص شد که با کاهش شاخص پلاستیسیته لایه زیرین، مقادیر برش پایه مدل‌های سازه‌ای با بستر انعطاف‌پذیر کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که تغییر مکان جانبی طبقه افزایش می‌یابد [۱۴].

طباطبائی فر و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل جدید و پیشرفته از سازه-خاک را با استفاده از روش تحلیل مستقیم برای شبیه‌سازی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه و بحث درباره رفتار خاک و سازه، بررسی کردند. نتایج بررسی‌های عددی بر روی سه نوع خاک با سرعت‌های موج برشی ۶۰۰، ۳۲۰ و ۱۵۰ متر بر ثانیه در این مطالعه نشان داد که اثرات اندرکنش دینامیکی خاک و سازه تأثیر مهمی در پاسخ لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی میان مرتبه مقاوم در برابر لنگر در خاک‌های با سرعت موج برشی ۳۲۰ متر بر ثانیه و ۱۵۰ متر بر ثانیه دارد [۵].

حکم‌آبادی و همکاران (۲۰۱۴) یک سری آزمایش‌های میز لرزان را انجام دادند و یک ظرف خاک لایه‌ای برای شبیه‌سازی پاسخ خاک میدان آزاد با به حداقل رساندن اثرات مرزی طراحی کردند و ابر سازه‌ای به‌عنوان یک قاب چندطبقه شبیه‌سازی نمودند که بیشترین خواص دینامیکی را برای سازه نمونه اولیه نشان می‌دهد. با استفاده از FLAC3D، یک مدل عددی غیرخطی سه‌بعدی برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی اجرای میرایی هیستریک خاک به‌منظور نشان دادن تغییر مدول برشی و نسبت میرایی خاک با کرنش برشی سیکی در نظر گرفتند. درنتیجه، اثرات اندرکنش لرزه‌ای خاک-شمع-سازه با افزایش تغییر مکان جانبی بین طبقه، بر سطح عملکرد سازه‌های قرارگرفته بر روی خاک نرم تأثیر می‌گذارد که ممکن است سطح عملکرد سازه را از زندگی سالم به سطح نزولی نزدیک و حتی فروریختن تغییر دهد؛ بنابراین، نادیده گرفتن تغییر شکل‌پذیری واقعی سیستم سازه-خاک، در هر دو مورد با پی‌های سطحی یا شمع، ممکن است منجر به ارزیابی غلط جابجایی‌های سازه‌ای و انحرافات طبقاتی شود که بر سطح خسارت پیش‌بینی شده سازه و المان‌های غیر سازه‌ای شود. [۱۰].

قندیل^۳ و همکاران (۲۰۱۷) تعدادی از ساختمان‌های کوتاه تا بلند با قاب‌های مقاوم در برابر لنگر در دو پروفیل خاک نرم تحت حرکات لرزه‌ای انتخابی و مقیاس بندی شده موردبررسی قرار دادند. آن‌ها از طریق یک تحلیل غیرخطی برای کل سیستم سازه-خاک، تقاضاهای شکل‌پذیری طبقه‌های مختلف برای دو مورد، با SSI و بدون SSI را محاسبه و نسبت آن‌ها را ارائه کردند. طبق نتایج ارائه شده، برخلاف تصور رایج، برای ساختمان‌های بلندتر تغییر مکان‌های جانبی با SSI حتی از سازه‌های پایه‌گیردار مشابه خود در طبقه‌های پایین‌تر نیز بزرگ‌تر بودند [۱۵].

² Veletsos

³ Ghandil

قفتان^۴ و همکاران (۲۰۲۰) به روش مقیاس‌گذاری و طراحی یک سازه قاب دیواری بتنی چندطبقه، با ضریب مقیاس ۱:۵۰ پرداخته‌اند. تحقیقات تجربی به سه مرحله مختلف تقسیم شده است: سازه ثابت و بدون اندرکنش خاک-سازه، ظرف خاک بدون هیچ‌گونه سازه‌ای و سازه‌ای با پی‌های رادیه و شمع در ظرف خاک. سرانجام، همان مراحل آزمایشی با استفاده از یک نرم‌افزار اجزای محدود سه‌بعدی به صورت عددی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در مقایسه با نتایج تجربی، پاسخ دقیق‌تری ایجاد می‌کنند و این مدل‌های عددی برای استفاده در مطالعات دینامیکی مناسب‌تر هستند [۱۶].

لئو و همکاران (۲۰۲۰) آزمایش‌های میز لرزان شامل خاک نرم و سازه قاب فلزی شش طبقه را که به‌طور خاص با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سازه-خاک طراحی شده، در دانشگاه Tongji چین انجام دادند. در این مطالعه پس از انجام یک مدل‌سازی در جهت صحت‌سنجی، مطالعات پارامتری گسترده‌ای با انواع مختلف خاک غیرخطی و خصوصیات سازه‌ای در نظر گرفته شده است. هدف آن‌ها ارزیابی جامع اثر اندرکنش خاک-سازه در پاسخ دینامیکی سازه بود که طبق نتایج این پژوهش، اثرات SSI پاسخ سازه‌ای را تحت تحریکات لرزه‌ای کاهش داده و پاسخ‌های دینامیکی سیستم SSI را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند [۱۷].

شارما و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر اندرکنش لرزه‌ای خاک و سازه را بر پی‌ریود طبیعی قاب ساختمان بتنی قرار گرفته بر پی‌های شمعی بررسی کردند. آن‌ها در بخش نتایج مقاله خود ذکر کردند که قاب‌های ساختمانی که توسط خاک سست پشتیبانی می‌شوند، بالاترین اثرات SSI را نشان می‌دهند که با سخت‌تر شدن خاک، کاهش می‌یابد [۸].

هوائی و ایزدپرست (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به بررسی اثر ضخامت بلوک خاک نرم در اندرکنش خاک-سازه و تغییرات در جابه‌جایی سازه با افزایش ضخامت خاک از ۳۰ متر به ۴۰، ۵۰ و ۶۰ متر پرداختند. آن‌ها پس از مدل‌سازی یک سازه ۱۵ طبقه در نرم‌افزار آباکوس نتیجه گرفتند که افزایش ضخامت لایه خاک موجب کاهش جابه‌جایی طبقات سازه می‌شود [۱۸].

ژبائوفنگ و فار (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به بررسی اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ طبقه پرداختند. آن‌ها پس از صحت‌سنجی یک مدل آزمایش میز لرزان در نرم‌افزار، با اعمال رکورد زلزله در حالت‌های پایه گیردار و انعطاف‌پذیر، حداکثر جابه‌جایی جانبی طبقات سازه را برای سازه‌ها با ارتفاع‌های مختلف بررسی و مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که لزوماً با افزایش ارتفاع سازه، در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه موجب افزایش تغییر مکان جانبی نمی‌شود و عواملی مانند ارتفاع سازه و ویژگی‌های حرکت زمین باید برای تعیین مفید یا مضر بودن SSI در نظر گرفته شود [۱۹].

زمانی که یک ساختمان روی یک خاک لایه‌ای قرار دارد، اندرکنش خاک و سازه تحت تأثیر جنس لایه‌ها و ترتیب قرارگیری آن‌ها و همچنین عمق هر لایه، دچار تغییراتی می‌شود. با توجه به ساختار لایه‌های خاک در برخی مناطق شهر کرمانشاه و قرارگیری یک لایه خاک نرم در عمق حدود ۱۰ متری سطح زمین و عدم توجه به اثرات اندرکنش این لایه در طراحی ساختمان‌ها، انجام پژوهشی در این زمینه لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

همچنین بررسی پژوهش‌های انجام شده در راستای این موضوع، نشان داد که تاکنون به‌طور مشخص در خصوص قرارگیری لایه نرم در مجاورت سازه و مقایسه آن با حالتی که لایه نرم در زیر یک لایه سخت قرار گرفته باشد تحقیقی صورت نگرفته است. لذا در این تحقیق سعی بر آن شده است تا با انجام یک مطالعه عددی سه بعدی، اثرات اندرکنشی قرارگیری لایه نرم در وضعیت‌های مختلف مجاور یا دورتر از سازه بر رفتار یک سازه بلندمرتبه با سیستم قاب خمشی مورد بررسی قرار گیرد.

⁴ Qaftan

۲- مبانی تحقیق

ایده‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی ماهیت نامحدود بودن محیط خاکی ارائه شده است. محدود کردن محیط خاکی به مرزهای مجازی در طرفین و کف را می‌توان متداول‌ترین این روش‌ها دانست. در این روش تنها بخش محدودی از محیط خاکی با استفاده از روش اجزا محدود مدل‌سازی شده و در محل مرزها به‌منظور جذب امواج رسیده به مرز و جلوگیری از بازتابش آن‌ها از مرزهای جاذب استفاده می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی مرزهای خاک برای کاهش اثرات مرزی که توسط برخی محققان مانند بری و همکاران توصیه شده است، در نظر گرفتن ابعاد خاک به‌اندازه ۴ برابر ضخامت خاک و ۸ برابر عرض پی است.

مدل‌های رفتاری الاستیک و یا الاستوپلاستیک مختلفی در طول سال‌های گذشته برای مدل‌سازی رفتار خاک در شرایط مختلف و تحت اثر نیروهای استاتیکی و دینامیکی توسعه داده شده است که با توجه به شرایط می‌توان به‌منظور شبیه‌سازی رفتار خاک از آن‌ها بهره برد. از جمله مدل‌های الاستوپلاستیک می‌توان به مدل‌های کلاسیک Cam-Clay، Mohr-coulomb و Drucker-Prager اشاره کرد که در بین آن‌ها از مدل Mohr-coulomb برای بررسی اندرکنش خاک-سازه استفاده شده است [۱۶] و [۱۹].

همچنین دیگر نکته قابل ذکر مربوط به سرعت موج برشی می‌باشد که در استاندارد ۲۸۰۰، بدون در نظر گرفتن ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک اعم از سخت و نرم، یک سرعت موج برشی معادل در نظر گرفته شده است که به نظر می‌رسد در خاک‌های لایه‌ای، قرارگیری لایه‌های خاک نرم در مجاورت پی اثرات متفاوتی را نسبت به قرارگیری لایه‌های سخت‌تر در زیر سازه ایجاد کند که در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در سال‌های اخیر با تغییر رویکرد در تأکید بر عملکرد به‌جای مقاومت، مجدداً مورد بررسی قرار گرفته است. در نظر گرفتن عملکرد کل ساختمان در طول فرآیند طراحی لرزه‌ای می‌تواند به‌عنوان نقطه کلیدی در طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد شناسایی شود، جایی که عملکرد کل ساختمان در طول فرآیند طراحی لرزه‌ای کنترل می‌شود. رابطه دینامیکی حرکت برای سازه می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$[M]\{u\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{\ddot{u}\} = -[M]I\{\ddot{u}_g\} + F_v \quad (1)$$

که $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی هستند. $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ و $\{\ddot{u}\}$ به ترتیب جابه‌جایی، سرعت و شتاب نسبی گره‌ها در سازه نسبت به زمین هستند. $\{\ddot{u}_g\}$ شتاب حرکت زمین است و F_v بردار نیروی مربوط به مرزهای ویسکوز است. این بردار تنها زمانی غیر صفر است که بین حرکت در سمت نزدیک مرز مصنوعی و حرکت در میدان آزاد تفاوت وجود داشته باشد.

مدل‌های آزمایشگاهی اغلب به‌عنوان معیار کالیبراسیون برای روش‌های عددی یا برای پیش‌بینی‌های کمی استفاده می‌شوند. در اکثر آزمایش‌های میز لرزان، روبنا به‌عنوان یک نوسانگر با یک درجه آزادی ساده‌سازی می‌شود که در آن رفتار سیستم خاک-سازه ممکن است کاملاً با واقعیت مطابقت نداشته باشد و اثرات موده‌های بالاتر ثبت نشود.

آباکوس مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی مهندسی قدرتمند مبتنی بر روش اجزای محدود و یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارها در زمینه شبیه‌سازی به روش اجزای محدود است که طیف وسیعی از قابلیت‌ها را برای شبیه‌سازی در روش‌های خطی و غیرخطی ارائه می‌دهد. در پژوهش حاضر، برای بررسی عملکرد مدل عددی، از صحت‌سنجی یک مدل آزمایشگاهی میز لرزان با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش مستقیم استفاده شده است. این مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس صورت گرفته است.

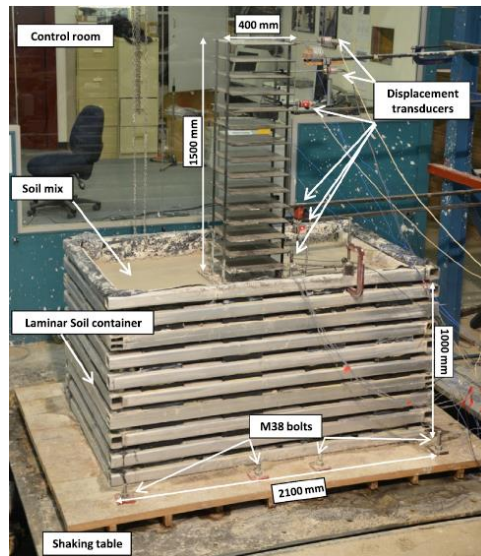
۳- صحت‌سنجی

برای انجام صحت‌سنجی مدل، از نتایج آزمایش میز لرزان حکم‌آبادی و همکاران در دانشگاه صنعتی سیدنی استرالیا (۲۰۱۴) استفاده شد. هدف حکم‌آبادی و همکاران، بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ دینامیکی سازه‌های متوسطی بود که بر روی پی گسترده در

آزمایشگاه مدل سازی شده بودند. آن ها با ایجاد مدل های آزمایشگاهی از سازه های ۱۵ طبقه و بررسی آن در حالت پایه گیردار و پی سطحی گسترده، اثرات اندرکنش بر پاسخ دینامیکی خاک و سازه مورد ارزیابی قرار دادند. حالت پایه گیردار وضعیتی را نشان می دهد که اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نشده است.

در این آزمایش، یک قاب چندطبقه برای سازه در نظر گرفته شده است که نشان دهنده ویژگی های دینامیکی سازه نمونه^۵ مانند فرکانس طبیعی موده های اول و بالاتر، تعداد طبقات و چگالی خاک است. علاوه بر این، یک ظرف حاوی خاک لایه ای برای شبیه سازی پاسخ خاک میدان آزاد با استفاده از به حداقل رساندن اثرات مرزی طراحی شده است. در نتیجه، آزمایش های رایج میز لرزان که انواع متداول شالوده ها را روی خاک نرم به همراه مدل پایه گیردار شبیه سازی می کنند، داده های منحصر به فرد و ارزشمندی را جهت بررسی تأثیر اندرکنش بر روی پاسخ لرزه ای ساختمان ها ارائه می کند.

اندازه میز لرزان ۳ متر در ۳ متر با حداکثر بار ۱۰ تن و لنگر واژگونی ۱۰۰ کیلو نیوتن در متر می باشد. علاوه بر این، میز لرزان می تواند حداکثر شتاب ($\pm 2/5 g$) معادل دو و نیم برابر شتاب زمین) را محدود فرکانس آزمایش ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز را اعمال کند. مدل ساخته شده در آزمایشگاه در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: مدل آزمایشگاهی میز لرزان [۱۰]

اتخاذ فاکتور مقیاس هندسی مناسب یکی از مهم ترین گام ها در مدل سازی مقیاسی در میز لرزان است. اگرچه مدل های مقیاس کوچک می تواند موجب صرفه جویی در هزینه شود، دقت نتایج را به شدت کاهش می دهد.

به منظور دستیابی به یک مدل با مقیاس منطقی، یک شبیه سازی دینامیکی بین مدل و نمونه باید اعمال شود. شبیه سازی دینامیکی بر شرایطی حاکم است که در آن بخش های همسان مدل و نمونه اولیه، نیروهای خالص همسان را تجربه می کنند. روابط مقیاس برای متغیرهای کمک کننده به موده های اولیه پاسخ سیستم در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: فاکتورهای مقیاس [۱۰]

| | | | | | |
|-----------|-------------|---------------|------------------|------|-------------|
| جرم مخصوص | ۱ | شتاب | ۱ | طول | λ |
| نیرو | λ^3 | سرعت موج برشی | $\lambda^{1/2}$ | تنش | λ |
| سختی | λ^2 | زمان | $\lambda^{1/2}$ | کرنش | ۱ |
| مدول | λ | فرکانس | $\lambda^{-1/2}$ | EI | λ^5 |

⁵ prototype

با در نظر گرفتن خصوصیات ذکرشده برای میز لرزان دانشگاه صنعتی سیدنی، فاکتور مقیاس ۱ به ۳۰، بزرگ‌ترین مدل مقیاس قابل دستیابی را با مقیاس‌های منطقی، حداکثر ظرفیت باربری و لنگر واژگونی مطابق با محدودیت‌های امکانات را ارائه می‌دهد؛ بنابراین ضریب مقیاس هندسی ۱ به ۳۰ برای آزمایش‌های تجربی میز لرزان در این مطالعه اتخاذ شده است.

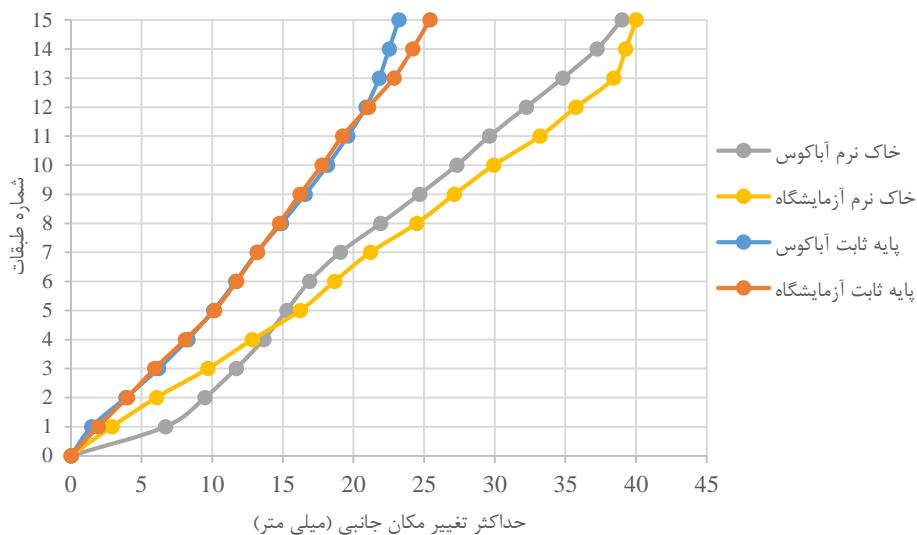
در مطالعه حکم‌آبادی و همکاران، حرکات لرزه‌ای زمین با مجموعه‌ای از زلزله‌های واقعی که در سنگ‌بستر تعریف شده‌اند، نشان داده شده است. هر مدل آزمایشی در معرض زلزله میدان نزدیک^۶ شامل کوبه ۱۹۹۵ و نورتریج ۱۹۹۴ و دو زلزله میدان دور^۷ شامل ال سانترو ۱۹۴۰ و هاچینوه ۱۹۶۸ قرار گرفت که در صحت سنجی انجام گرفته در مقاله حاضر، زلزله نورتریج ۱۹۹۴ برای سازه ۱۵ طبقه اعمال شد.

برای شبیه‌سازی عددی از حل گر Dynamic implicit استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار خاک، مدل موهر-کولمب به کاررفته است و برای کاهش اثرات مرزی، ابعاد خاک از هر طرف، ۵ برابر بعد پی در نظر گرفته شده است.

طبق نتایج تحلیل حاصل از مدل‌سازی عددی آزمایش میز لرزان در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس نسخه ۲۰۲۱، تطابق مناسبی بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. به همین منظور، نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای میزان فرکانس سازه در حالت پایه گیردار و قرارگیری بر روی خاک در جدول ۲ و همچنین میزان جابه‌جایی طبقات در شکل ۲ برای حالت آزمایشگاهی و مدل عددی نمایش داده شده است.

جدول ۲: مقایسه فرکانس سازه در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

| نوع مدل | فرکانس سازه در حالت پایه گیردار (هرتز) | فرکانس سازه در حالت پایه انعطاف‌پذیر (هرتز) |
|------------|--|---|
| آزمایشگاهی | ۲/۱۱ | ۱/۶۵ |
| عددی | ۲/۱۳ | ۱/۸۷ |



شکل ۲: مقایسه حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

⁶ Near field shaking events

⁷ far field

۴- مدل سازی عددی سه بعدی

۴-۱- معرفی مشخصات سازه و فونداسیون

نمونه اولیه سازه مورد استفاده در این مطالعه یک قاب ساختمانی ۱۵ طبقه بتنی با سیستم قاب خمشی به ارتفاع ۴۵ متر و عرض ۱۲ متر، شامل سه دهانه در هر جهت می باشد. این قاب ساختمانی از انواع مرسوم ساختمان های قاب خمشی متوسط است. مقاطع سازه ای پس از انجام یک روش طراحی معمولی مطابق آیین نامه های ساختمانی با استفاده از SAP2000 تنظیم شده است در جدول ۲ مشخصات ستون های بتنی و در جدول ۳ مشخصات دال های کف و فونداسیون که در مدل سازی استفاده شده اند آورده شده است. همچنین، شکل ۳ مدل سه بعدی ساختمان ۱۵ طبقه و جزییات مقاطع ستون، دال طبقات و فونداسیون را نشان می دهد. ویژگی های ساختمان نشان دهنده شیوه های ساخت و ساز ساختمان های معمولی در شهرهای بزرگ است و به طور خاص برای بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین این سازه ۱۵ طبقه برای مقابله با بارهای استاتیکی و دینامیکی و برآورده کردن نیاز ظرفیت باربری بر روی یک فونداسیون گسترده مربعی به عرض ۱۵ متر و ضخامت ۱ متر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که برای بررسی دقیق رفتار واقعی سازه تحت اثر SSI یک روش مدل سازی عددی سه بعدی در نرم افزار ABAQUS انجام شده است.

در جدول ۲ مشخصات ستون های بتنی و در جدول ۳ مشخصات دال های کف و فونداسیون که در مدل سازی استفاده شده اند آورده شده است. همچنین، شکل ۳ مدل سه بعدی ساختمان ۱۵ طبقه را نشان می دهد. در این مطالعه، رفتار الاستوپلاستیک کامل (شکل ۴) برای عناصر سازه ای در نظر گرفته شد که در آن، هر المان تا زمانی که به تنش تسلیم برسد، رفتار الاستیک دارد و پس از آن بدون ایجاد تنش اضافی به تغییر شکل ادامه می دهد.

علاوه بر این، میرایی سازه با استفاده از میرایی رایلی شبیه سازی شد. معادله میرایی رایلی به صورت معادله (۲) بیان شده است که در آن ماتریس میرایی (C) با مؤلفه های متناسب با ماتریس های جرم (M) و سختی (K) تشکیل می شود.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

در رابطه فوق α و β به ترتیب ثابت های میرایی متناسب با جرم و سختی هستند. معادله (۳) رابطه بین نسبت میرایی (ξ) و ثابت های میرایی α و β را نشان می دهد.

$$\xi = \frac{\alpha}{4\pi f} + \beta \pi f \quad (3)$$

ثابت های میرایی رایلی (α و β) را می توان با استفاده از معادلات (۴) و (۵) با حل معادله (۲) برای دو فرکانس هدف (f_i و f_j) همراه با نسبت میرایی هدف مربوطه (ξ_i) محاسبه کرد.

$$\alpha = \xi_i \frac{4\pi f_i f_j}{f_i + f_j} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\xi_i}{\pi(f_i + f_j)} \quad (5)$$

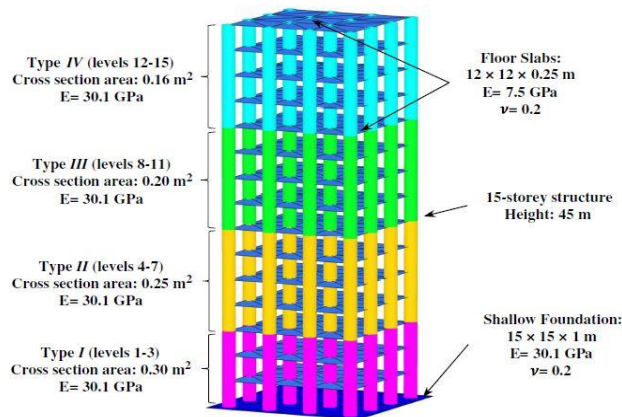
در این مطالعه ماتریس میرایی از نوع رایلی با ۵ درصد میرایی برای سازه و خاک در نظر گرفته شده و ضرایب میرایی α و β بر اساس موده‌های اول و دوم حاصل از آنالیز مودال به دست آمده است؛ بنابراین ابتدا به منظور به دست آوردن ضرایب میرایی، آنالیز مودال انجام شده است و سپس مسئله تحت تحلیل لرزهای قرار گرفته است.

جدول ۳: مشخصات ستون بتنی در مدل مورد بررسی

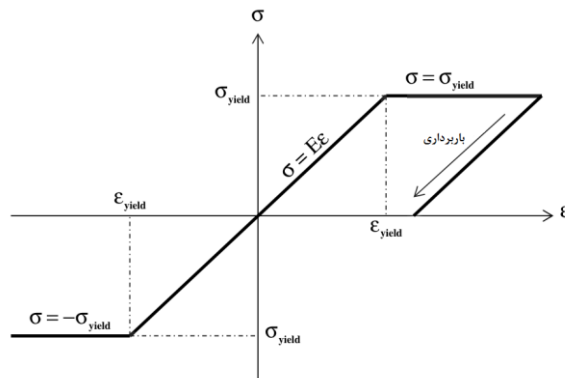
| ستون طبقات | EI (MPa.m ⁴) | EA (MPa.m ²) | وزن مخصوص (KN/m ³) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| ۱۲-۱۵ | ۴۴/۵۵ | ۴۸۱۶ | ۲۴ |
| ۸-۱۱ | ۷۱/۹۴ | ۶۰۲۰ | ۲۴ |
| ۴-۷ | ۱۰۹/۸۷ | ۷۵۲۵ | ۲۴ |
| ۱-۳ | ۱۶۰/۷۳ | ۹۰۳۰ | ۲۴ |

جدول ۴: مشخصات دال‌های کف و فونداسیون

| المان‌های سازه‌ای | مدول یانگ E (GPa) | مدول برشی G (GPa) | وزن مخصوص (KN/m ²) |
|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| دال کف | ۷/۵ | ۳/۱ | ۲۴ |
| فونداسیون | ۳۰/۱ | ۱۲/۵ | ۲۴ |



شکل ۳: مدل سه‌بعدی سازه [۲۰]



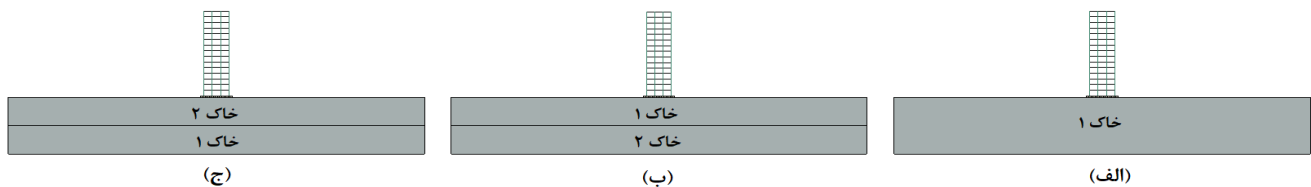
شکل ۴: رفتار الاستوپلاستیک کامل

۴-۲- معرفی مشخصات خاک

در این تحقیق ابتدا یک لایه خاک به ضخامت ۳۰ متر واقع بر سنگ‌بستر با استفاده از شرایط مرزی مختلف مدل شد. هنگام استفاده از روش‌های عددی برای حل مسئله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، به طور کلی استخراج یک مساحت محاسباتی محدود از محیط بی‌نهایت اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به پیشنهاد بری و همکاران، به‌منظور حداقل نمودن اثرات مرزی اندازه مدل عددی باید چهار برابر ضخامت خاک و هشت برابر عرض پی باشد، همچنین، ریحانی و ال‌ناگار (۲۰۰۸) حداکثر عمق سنگ بستر ۳۰ متر را برای استفاده در تجزیه و تحلیل عددی توصیه کردند. که با توجه به صحت‌سنجی انجام شده در ابتدا تحقیق، و به دست آمدن نتایج قابل قبول با روش مذکور ابعاد خاک تعیین شد. مشخصات خاک مورد مطالعه که به‌صورت موردی از مطالعات ژئوتکنیکی واقعی در شهر کرمانشاه برداشت شده است در جدول ۴ آمده است. همچنین از عناصر جامد^۸ برای مدل‌سازی خاک استفاده شد و معیار شکست Mohr-coulomb مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه اثر سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است. همچنین برای در نظر گرفتن اثر قرارگیری لایه‌های مختلف خاک بر اندرکنش خاک و سازه، سیستم خاک در سه حالت مختلف مدل شده است، در حالت (الف) کل ۳۰ متر ضخامت خاک را خاک ۱ (خاک نرم) تشکیل می‌دهد. در حالت (ب) و (ج) خاک به دو قسمت ۱۵ متری تقسیم شده است، که به ترتیب در حالت (ب) ابتدا خاک نرم در مجاورت سطح پی می‌باشد و حالت (ج) خاک سخت در مجاورت سطح پی می‌باشد که در شکل ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۵: مشخصات لایه‌های خاک

| نوع لایه | وزن مخصوص (kg/m ³) | حداکثر مدول برشی Gmax (MPa) | سرعت موج برشی Vs (m/s) | نسبت پواسون (ν) | زاویه اصطکاک (φ) | چسبندگی C (kPa) |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| خاک ۱ (خاک نرم) | ۱۸۸۰ | ۳۵/۲ | ۱۳۷ | ۰/۳ | ۲۳ | ۹ |
| خاک ۲ (خاک سخت) | ۲۰۸۰ | ۳۵۳ | ۴۱۲ | ۳۵ | ۳۱ | ۷ |



شکل ۵: حالت‌های مختلف لایه‌های خاک

۴-۳- معرفی مدل عددی

عمدتاً دو روش تحلیلی ضمنی^۹ و صریح^{۱۰} برای حل رفتار دینامیکی در تجزیه و تحلیل اجزا محدود وجود دارد. تحلیل صریح از تکرارهای نیوتن-رافسون برای اجرای تعادل بین نیروهای خارجی اعمال شده و نیروهای سازه ای داخلی استفاده می‌کند. بنابراین، برای تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی بزرگتر، دقیق‌تر است [۲۱]. از آنجا که تاریخ کل زمان مدل در این مطالعه (۳۰ ثانیه) برای زلزله Northridge و (۴۴ ثانیه) برای زلزله Cape Mendocino به‌طور قابل توجهی زیاد است، روش تلفیقی ضمنی با افزایش زمان ۰,۰۲ ثانیه اجرا شد. در مدل عددی از المان‌های پوسته R۴S برای مدل‌سازی کف، المان‌های تیر ۳۱B برای مدل‌سازی ستون‌ها و المان‌های RAD۳C برای مدل‌سازی پی و خاک استفاده شده است. پس از ایجاد مدل عددی برای سه مدل خاک-سازه با لایه‌بندی مختلف، بار زلزله به سطح زیرین خاک وارد شد.

^۸ Solid elements^۹ Implicit^{۱۰} explicit

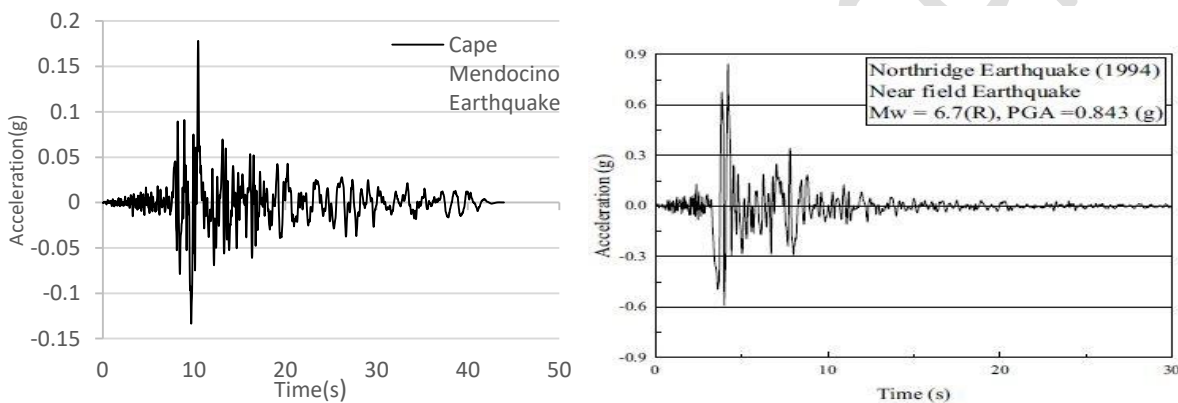
۴-۳-۱- شرایط تماسی و مرزی

برای شبیه‌سازی اندرکنش بین سطح زیرین پی (سطح پایه^{۱۱}) و سطح بالایی محیط خاک (سطح پیرو^{۱۲}) در هنگام بارگذاری لرزه‌ای از تماس سطح به سطح استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی اندرکنش بین خاک و پی از روش لغزش محدود^{۱۳} و روش گسسته سطح به سطح^{۱۴} استفاده شده است.

در شبیه‌سازی عددی، رفتار مکانیکی سطوح تماس به رفتار نرمال و مماسی تقسیم می‌شود. برای مدل‌سازی عددی رفتار نرمال از تماس سخت^{۱۵} و برای رفتار مماسی^{۱۶}، فرمول اصطکاک پنالتی^{۱۷} استفاده شده است و داده‌های وابسته به فشار تماس برای شبیه‌سازی معیار شکست موهر کولمب بین سطوح تماس پی و خاک به کار رفته است.

۴-۳-۲- حرکت ورودی لرزه‌ای

با توجه به اینکه زلزله‌های قوی می‌تواند باعث آسیب شدید به سازه شود، حرکت زمین ثبت شده در طول زلزله Northridge که یکی از پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی در تاریخ است، به عنوان تحریک ورودی در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شد. همچنین به منظور مقایسه و نتیجه‌گیری با ملزومات استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، از شتابنگاشت "Cape Mendocino" منطبق بر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ استفاده گردید. رکورد این زلزله‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: رکورد زلزله Northridge و Cape Mendocino

همچنین مشخصات حرکت زمین لرزه‌ها و مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول ۶: ویژگی‌های حرکت زلزله اتخاذ شده

| مقدار | مقدار | مشخصات |
|----------------|-------------|--------|
| Cape Mendocino | Northridge | زلزله |
| کالیفرنیا | آمریکا | کشور |
| ۱۹۹۲ | ۱۹۹۴ | سال |
| ۰/۱۷۸ | ۰/۸۴۳ | PGA(g) |
| ۷/۰۲ | ۶/۷ | Mw(R) |
| ۴۳/۹۶ | ۳۰ | T(s) |
| میدان دور | میدان نزدیک | نوع |

¹¹ Master

¹² Slave

¹³ Finite sliding

¹⁴ Surface to surface

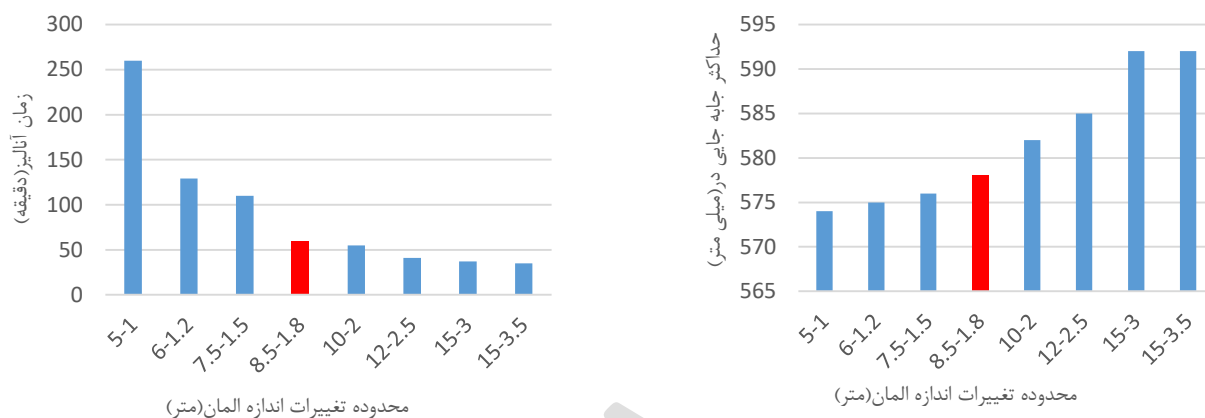
¹⁵ Hard contact

¹⁶ Tangential behavior

¹⁷ Friction formulation

۳-۴-۳- آنالیز حساسیت مش

به منظور اطمینان از دقت نتایج عددی و به دست آوردن تعداد مش بهینه در خاک، همچنین جلوگیری از صرف زمان بسیار زیاد تحلیل به علت مش بندی ریز، آنالیز حساسیت مش بندی با ۸ اندازه متفاوت انجام گرفت که نتایج مربوطه در شکل ۷ آمده است. به منظور همگرا شدن مش بندی از نتایج جابه جایی گره ۱۹۳۱ در طبقه هفتم استفاده شده است. همچنین نمودار سایز مش نسبت به زمان ارائه شده است. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه مش از بازه ۸/۵-۱/۸ اختلاف جابه جایی در گره ۱۹۳۱ در بازه های بعدی روند کاهشی یکنواختی دارد همچنین زمان آنالیز به طور چشم گیری افزایش می یابد. بنابراین اندازه مش انتخابی در خاک به صورت بازه ۸/۵-۱/۸ انتخاب شده است.



شکل ۷: نمودار آنالیز حساسیت مش بندی

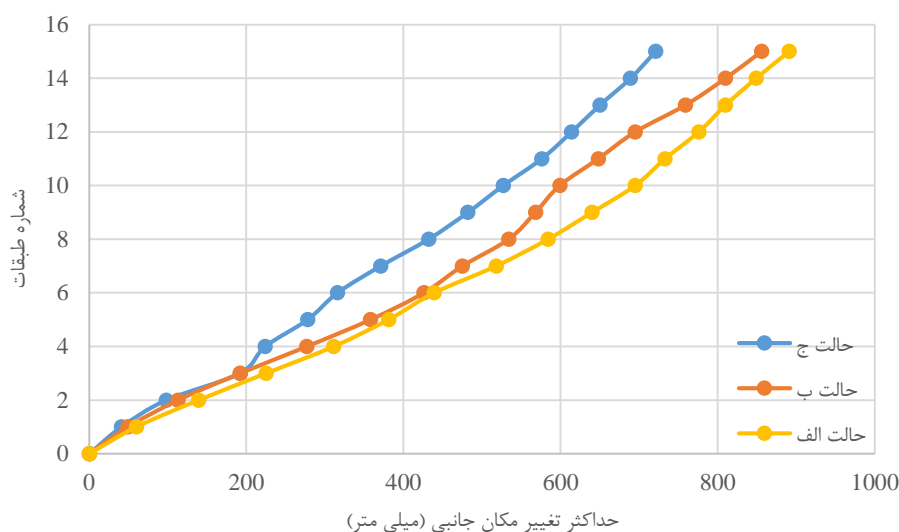
۵- نتایج

نتایج تحلیل دینامیکی مدل ۱۵ طبقه از نظر حداکثر تغییر مکان جانبی در پایان آنالیز، برش پایه، جابه جایی نسبی طبقات و طیف پاسخ شتاب تحت تأثیر رکورد زلزله Northridge و Cape Mendocino برای سیستم SSI با لایه بندی مختلف خاک در زیر ارائه شد.

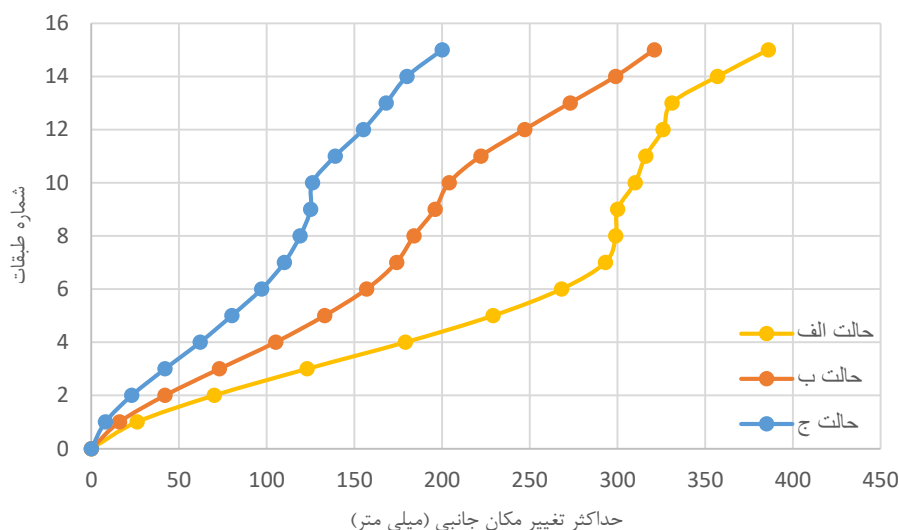
شکل ۸ و ۹ حداکثر جابه جایی جانبی سطوح مختلف سازه را برای حالت کل لایه خاک نرم (حالت الف)، لایه مجاور پی نرم و لایه زیرین سخت (حالت ب) و لایه مجاور پی سخت و لایه زیرین نرم (حالت ج) در زلزله های Northridge و Cape Mendocino را نشان می دهد.

با توجه به شکل ۸ و ۹، هرچه ضخامت لایه خاک نرم بیشتر و به سطح زمین نزدیک تر باشد، مقدار حداکثر تغییر مکان جانبی طبقات بیشتر می باشد. همچنین تفاوت در سختی لایه های خاک و موقعیت قرارگیری آن ها موجب پاسخ متفاوتی می گردد.

نتایج نشان داد که حداکثر تغییر مکان جانبی در حالتی که خاک با سختی کمتر در مجاورت پی قرار دارد (حالت ب) نسبت به حالتی که خاک با سختی بیشتر در مجاورت پی است (حالت ج) مقدار بیشتری دارد. مقایسه بین حداکثر تغییر مکان جانبی در سه حالت خاک نشان داد که برای سطوح دو، هفت و پانزده مقدار حداکثر تغییر مکان جانبی در حالت «ب» نسبت به حالت «الف» در زلزله Northridge به ترتیب به مقدار ۱۹٪، ۸٪ و ۴٪ و برای حالت «ج» نسبت به «ب» به ترتیب به صورت ۱۵٪، ۲۸٪ و ۱۸٪ کاهش می یابد. همچنین این مقادیر برای زلزله Cape Mendocino در حالت «ب» نسبت به حالت «الف» به ترتیب به مقدار ۶۲٪، ۶۸٪ و ۲۰٪ و برای حالت «ج» نسبت به «ب» به ترتیب به صورت ۳۰٪، ۷۶٪ و ۶۰٪ کاهش می یابد.



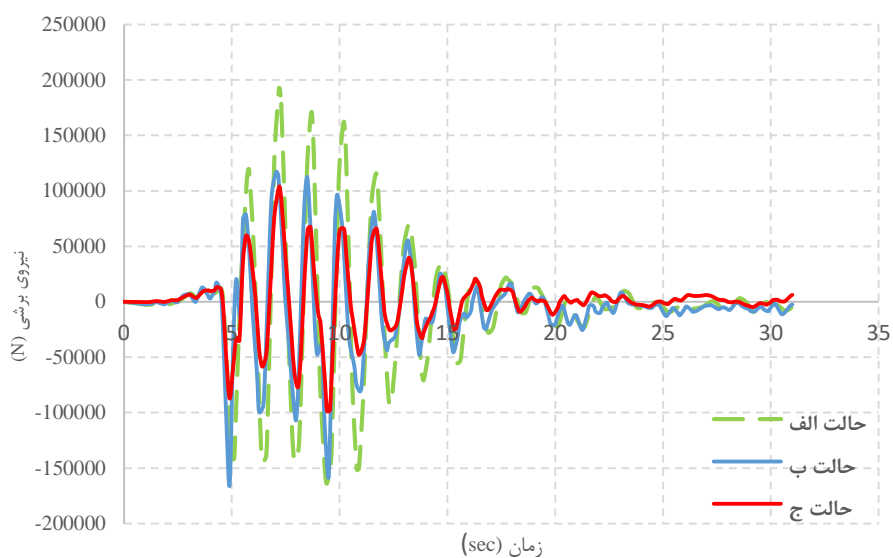
شکل ۸: حداکثر جابه‌جایی جانبی ساختمان تحت اثر زلزله Northridge برای حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک



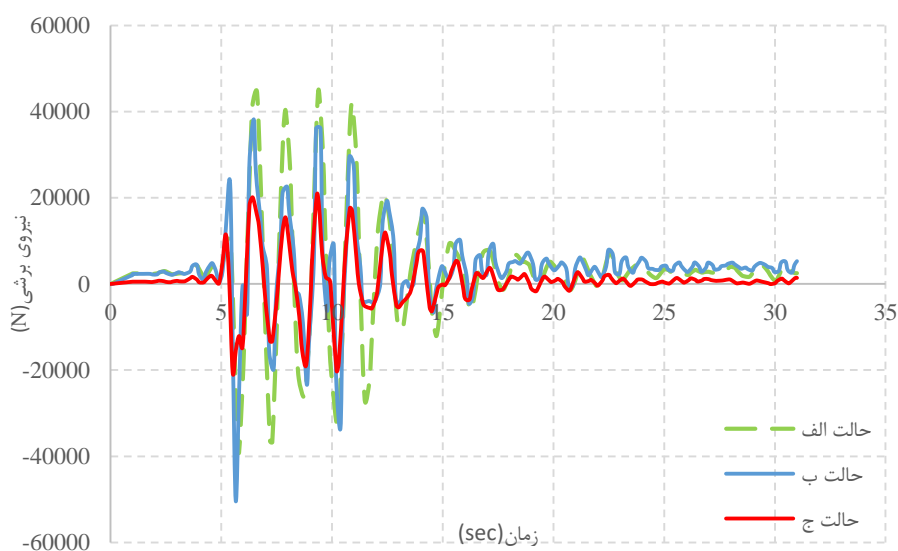
شکل ۹: حداکثر جابه‌جایی جانبی ساختمان تحت اثر زلزله Cape Mendocino برای حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقادیر نیروی برشی برحسب زمان برای زلزله Northridge و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ برای زلزله Cape Mendocino به ترتیب در طبقات ۲ و ۱۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که هرچه ضخامت لایه خاک با سرعت موج برشی کمتر (لایه خاک نرم) بیشتر باشد، مقدار نیروی برشی افزایش می‌یابد.

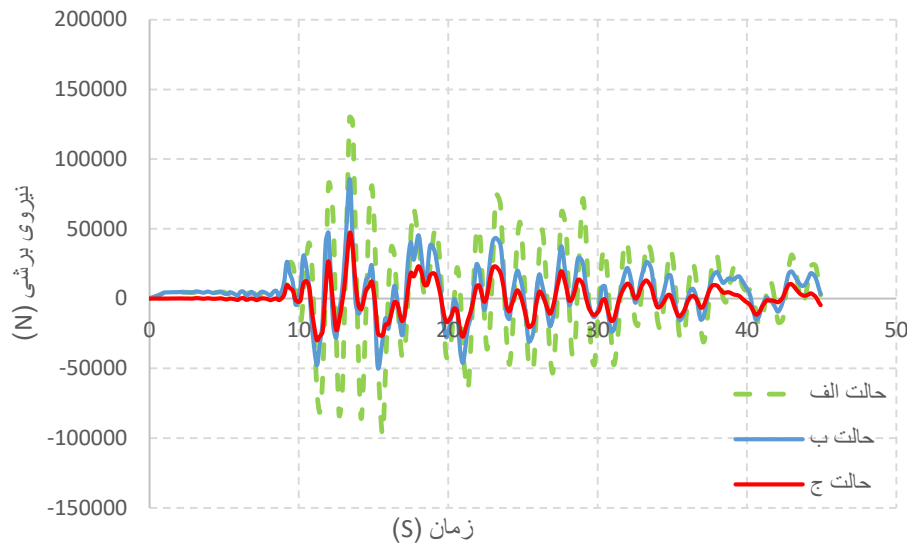
همچنین قرارگیری لایه خاک نرم در مجاورت پی موجب افزایش نیروی برشی شده است؛ بنابراین سازه در حالت «الف» بیشترین و در حالت «ج» کمترین مقدار نیروی برشی را تجربه می‌کند. لازم به ذکر است مقدار نیروی برشی در طبقات بالاتر نسبت به طبقات پایین‌تر کاهش یافته است.



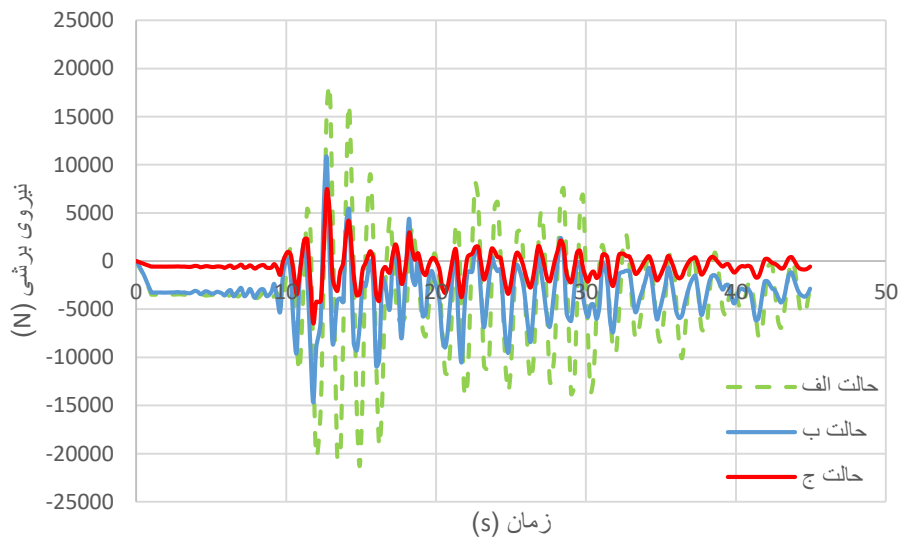
شکل ۱۰: نمودار نیروی برشی برحسب زمان برای ستون‌های گوشه در طبقه «دوم» تحت اثر زلزله Northridge با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک



شکل ۱۱: نمودار نیروی برشی برحسب زمان برای ستون‌های گوشه در طبقه «پانزدهم» تحت اثر زلزله Northridge با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک



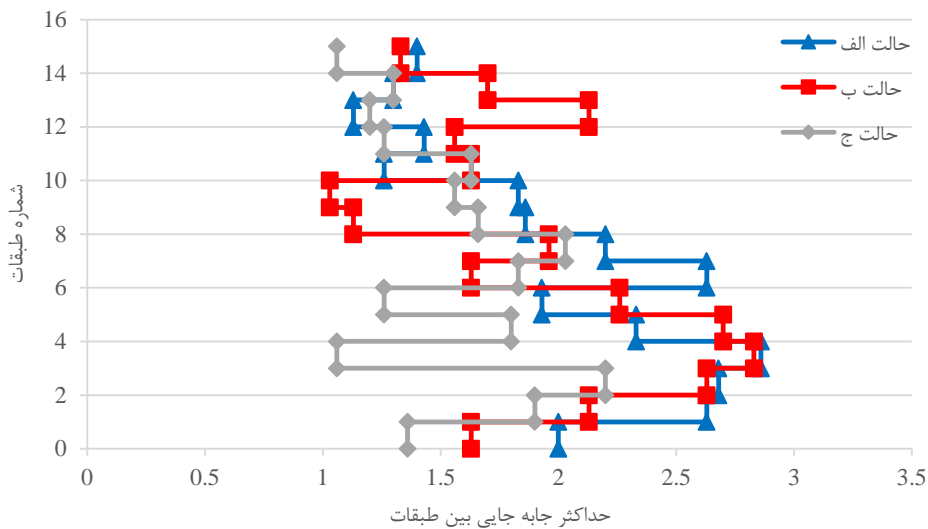
شکل ۱۲: نمودار نیروی برشی برحسب زمان برای ستون‌های گوشه در طبقه «دوم» تحت اثر زلزله Cape Mendocino با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک



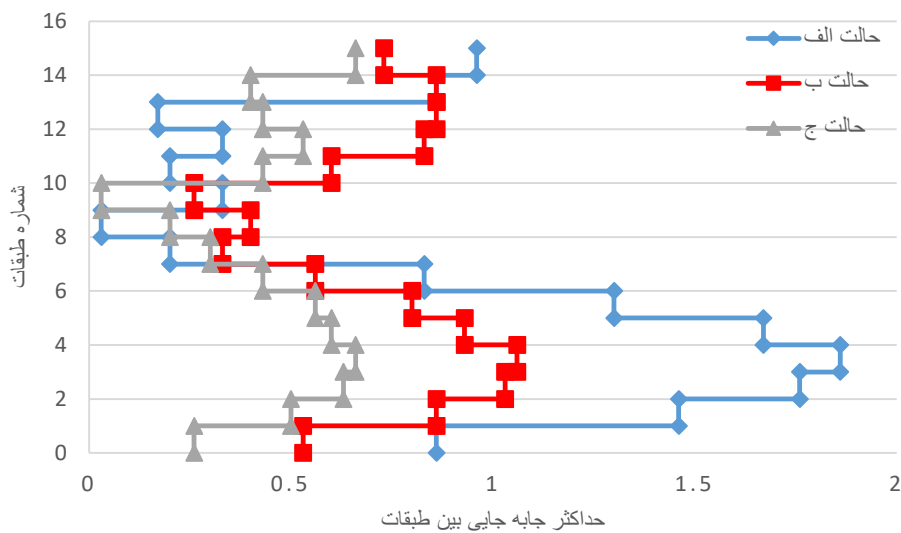
شکل ۱۳: نمودار نیروی برشی برحسب زمان برای ستون‌های گوشه در طبقه «پانزدهم» تحت اثر زلزله Cape Mendocino با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک

شکل ۱۴ و ۱۵ جابه‌جایی نسبی طبقات سازه را در سه حالت قرارگیری لایه‌های خاک نشان می‌دهد. با توجه به شکل، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات به صورت میانگین در حالتی که لایه خاک سخت در مجاورت پی قرار دارد (حالت ج)، کمتر از حالات دیگر است.

مقدار جابه‌جایی نسبی طبقات در سطوح دو، هفت و پانزده در حالتی که خاک نرم در مجاورت پی قرار دارد (حالت ب)، در زلزله Northridge به ترتیب ۱۹٪، ۳۸٪ و ۵٪ و در زلزله Cape Mendocino به ترتیب ۶۹٪، ۴۸٪ و ۳۱٪ نسبت به حالت «الف» کمتر است. این مقادیر در حالت «ج» نسبت به «الف» در زلزله Northridge به ترتیب ۲۷٪، ۳۰٪ و ۲۴٪ و در زلزله Cape Mendocino به ترتیب ۱۹۲٪، ۹۳٪ و ۴۵٪ تغییر می‌کند.

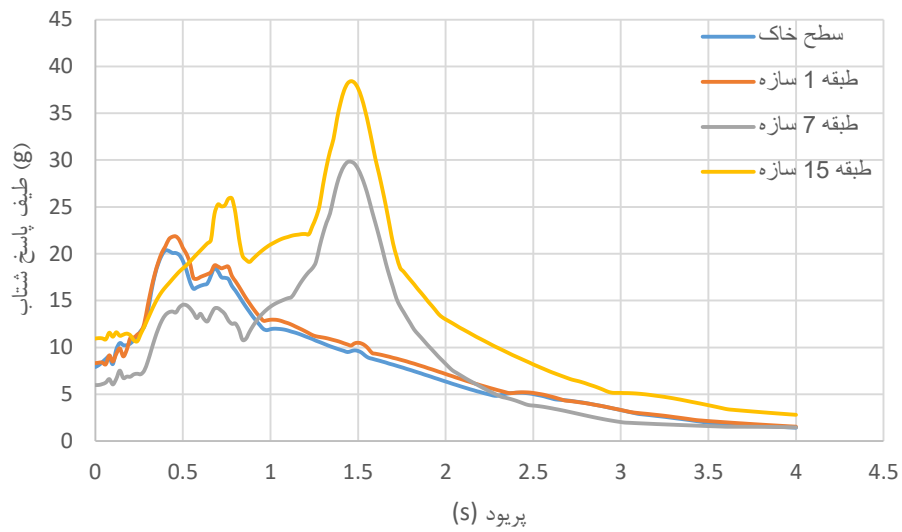


شکل ۱۴: حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان ۱۵ طبقه تحت اثر زلزله Northridge با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک

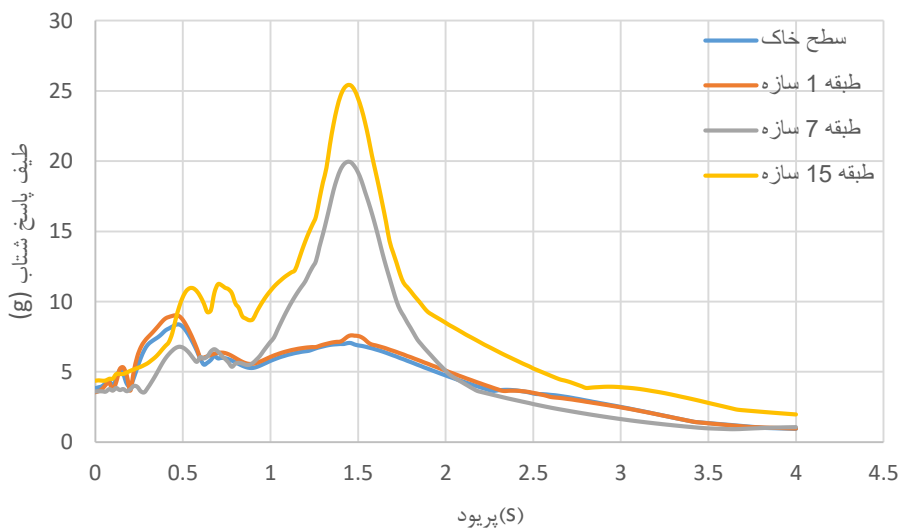


شکل ۱۵: حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان ۱۵ طبقه تحت اثر زلزله Cape Mendocino با حالات مختلف قرارگیری لایه‌های خاک

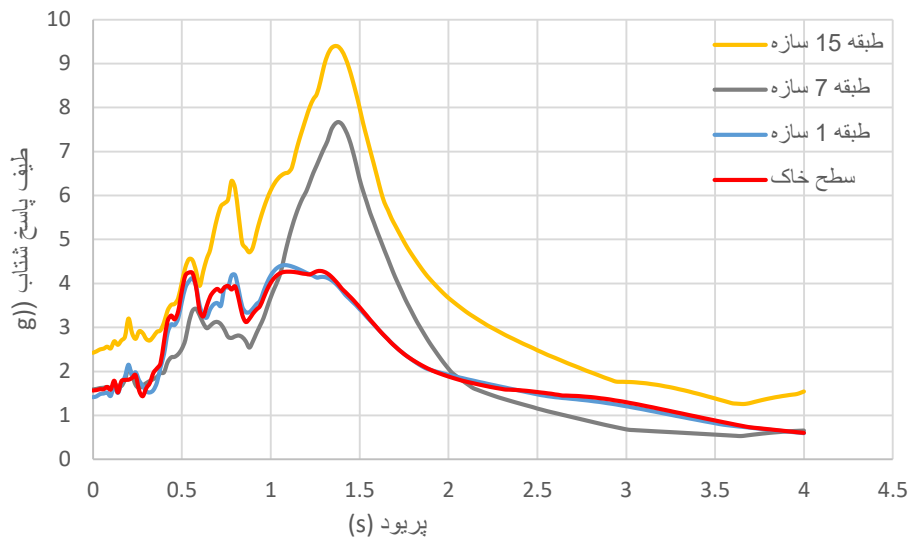
در شکل ۱۵ و ۱۶ طیف پاسخ شتاب در دو حالت خاک نرم در مجاورت پی و خاک سخت در مجاورت پی، از تراز سطح خاک تا طبقه آخر برای زلزله Northridge و شکل های ۱۷ و ۱۸ برای زلزله Cape Mendocino نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای بدست آمده در اثر بزرگنمایی شتاب، پاسخ‌های سازه با افزایش ارتفاع طبقات افزایش می‌یابد. همچنین زمانی که خاک نرم در مجاورت پی قرار دارد، حداکثر مقدار طیف پاسخ شتاب در طبقه ۱۵ نسبت به حالتی که خاک سخت در مجاورت پی قرار دارد، در زلزله Northridge، ۵۱٪، و در زلزله Cape Mendocino، ۷۵٪ بیشتر می‌باشد.



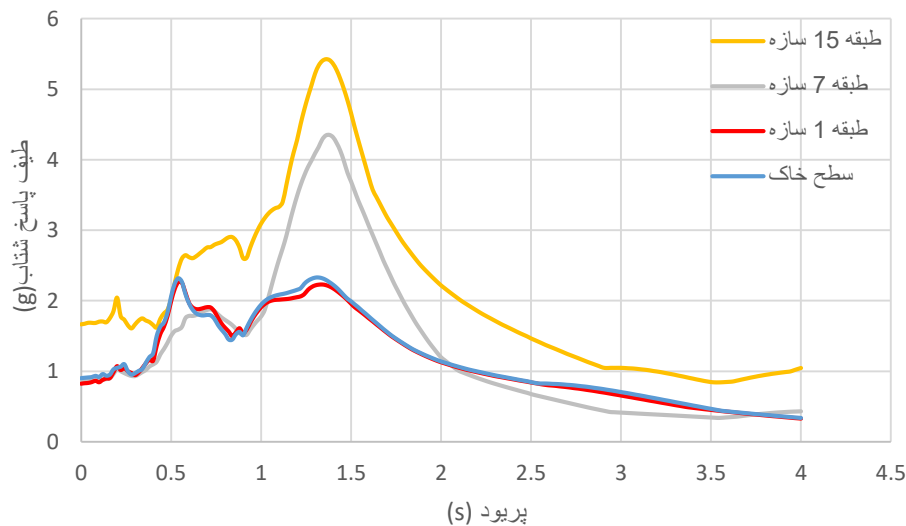
شکل ۱۵: طیف پاسخ شتاب در نقاط مختلف تحت اثر زلزله Northridge در حالت خاک نرم در مجاورت پی



شکل ۱۶: طیف پاسخ شتاب در نقاط مختلف تحت اثر زلزله Northridge در حالت خاک سخت در مجاورت پی



شکل ۱۷: طیف پاسخ شتاب در نقاط مختلف تحت اثر زلزله Cape Mendocino در حالت خاک نرم در مجاورت پی



شکل ۱۸: طیف پاسخ شتاب در نقاط مختلف تحت اثر زلزله Cape Mendocino در حالت خاک سخت در مجاورت پی

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک مدل سازه-خاک در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS برای بررسی تأثیر لایه بندی و عمق لایه خاک با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه برای یک سازه ۱۵ طبقه که بروی یک پی سطحی قرار گرفته، انجام شده است. دقت مدل عددی با توجه به نتایج آزمایش میز لرزان قبلی، ارزیابی و صحت مدل با استفاده از مقایسه حداکثر جابه جایی جانبی طبقات و فرکانس سازه، تطابق مناسبی را نشان داد. سپس با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی خاک که، به صورت موردی از مطالعات ژئوتکنیکی واقعی در شهر کرمانشاه برداشت شده، شبیه سازی عددی بر روی سه نوع حالت قرارگیری خاک انجام شد. در حالت اول تمام لایه خاک از نوع نرم با سرعت موج برشی کم، در حالت دوم خاک مجاور پی از نوع خاک نرم و لایه زیرین از نوع خاک سخت با سرعت موج برشی بیشتر و در حالت سوم لایه مجاور پی از نوع خاک

سخت و لایه زیرین از نوع خاک نرم در نظر گرفته شد. همچنین برای بارگذاری دینامیکی سیستم، از زلزله Northridge و Cape Mendocino استفاده شده است.

مهم‌ترین نتایج تحقیق عبارت‌اند از:

۱- انجام آنالیز حساسیت مش در مدل ساخته شده نشان داد که با کاهش اندازه مش، از بازه ۸/۵-۱/۸ اختلاف جابه‌جایی در بازه‌های بعدی روند کاهشی یکنواختی داشته و زمان آنالیز را به شدت افزایش می‌دهد. بنابراین این بازه به عنوان اندازه مش انتخابی بهینه در مدلسازی استفاده شده است.

۲- در صورتی که لایه خاک نرم در فاصله کمتری از سطح زمین قرار گیرد، مقادیر حداکثر جابه‌جایی جانبی، نیروی برشی، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات و طیف پاسخ شتاب بیشتر از حالتی است که لایه با سرعت موج برشی بیشتر در مجاورت پی قرار گیرد. بنابراین، به منظور طراحی ایمن و اقتصادی بایستی ترتیب قرارگیری لایه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

۳- نتایج تحلیل مدل سازه-خاک در حالت‌های مختلف نشان داد که افزایش ارتفاع لایه خاک نرم موجب افزایش حداکثر جابه‌جایی جانبی، نیروی برشی، طیف پاسخ شتاب و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات سازه می‌شود به طوری که این مقادیر به ترتیب برای حالت کل لایه از نوع خاک نرم، خاک لایه‌ای با قرارگیری خاک نرم در مجاورت پی و خاک لایه‌ای با قرارگیری خاک سخت در مجاورت پی دارای بیشترین مقادیر بودند.

۴- در حالتی که لایه مجاور پی از نوع خاک نرم و لایه زیرین خاک سخت باشد، نسبت به حالتی که تمام لایه خاک از نوع خاک نرم است مقدار حداکثر تغییر مکان جانبی برای طبقات دو، هفت و پانزده برای زلزله Northridge به ترتیب به مقدار ۱۹٪، ۸٪ و ۴٪ و برای زلزله Cape Mendocino به ترتیب به مقدار ۶۲٪، ۶۸٪ و ۲۰٪ کاهش می‌یابد.

۵- برای خاک لایه‌ای، در صورتی که خاک سخت در مجاورت پی قرار داشته باشد، مقدار حداکثر تغییر مکان جانبی برای طبقات دو، هفت و پانزده Northridge به ترتیب ۳۰٪، ۲۸٪ و ۱۹٪ و زلزله Cape Mendocino به ترتیب به صورت ۳۰٪، ۷۶٪ و ۶۰٪ کمتر از حالتی است که تمام خاک از نوع نرم در مجاورت پی است.

۶- مقدار جابه‌جایی نسبی طبقات برای سطوح دو، هفت و پانزده در حالتی که خاک نرم در مجاورت پی قرار دارد، در زلزله Northridge به ترتیب ۱۹٪، ۳۸٪ و ۵٪ و در زلزله Cape Mendocino به ترتیب ۱۹۲٪، ۹۳٪ و ۴۵٪ نسبت به حالتی که خاک زیر پی تک لایه و از نوع خاک نرم باشد، کمتر است.

۷- با مقایسه نتایج مدل‌سازی در طبقات دو، هفت و پانزده مشخص شد که مقدار جابه‌جایی نسبی طبقات برای حالتی که خاک سخت در مجاورت پی قرار داشته باشد، در زلزله Northridge به ترتیب ۲۷٪، ۳۰٪ و ۲۴٪ و در زلزله Cape Mendocino به ترتیب ۱۹۲٪، ۹۳٪ و ۴۵٪ نسبت به حالتی که کل لایه خاک از نوع نرم است، کاهش می‌یابد.

۸- حداکثر مقدار طیف پاسخ شتاب در طبقه ۱۵، در حالت قرارگیری خاک نرم در مجاورت پی نسبت به قرارگیری خاک سخت در مجاورت پی، برای دو زلزله Northridge و Cape Mendocino به ترتیب ۵۱٪ و ۷۵٪ بیشتر می‌باشد.

طبق نتایج این مطالعه، پاسخ‌های لرزه‌ای سیستم تحت تأثیر عمق و ترتیب قرارگیری لایه خاک نرم، مختلف می‌باشد که با توجه به قرارگیری شهر کرمانشاه در منطقه با خطر نسبی زلزله زیاد، لزوم در نظرگیری این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد. از طرفی آیین‌نامه ۲۸۰۰ بر در نظر گرفتن سرعت موج برشی معادل برای ۳۰ متر اول خاک و بدون در نظر گرفتن ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک اعم از سخت و نرم تأکید دارد؛ بنابراین ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک نرم در سطوح نزدیک به پی سازه تأثیرات قابل توجهی بر پاسخ سازه دارد. لذا با عنایت به این موضوع پیشنهاد می‌گردد در دستورالعمل‌های آیین‌نامه مبنی بر برآورد نیروی برش پایه و تیپ بندی خاک‌ها، ترتیب قرارگیری لایه‌ها و فاصله لایه خاک نرم تا سطح پی مورد توجه قرار گیرد.

منابع

- [1] Kausel, E. (2010). Early history of soil-structure interaction. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 30, 822-832.
- [2] Anand, V. and Satish Kumar, S. R. (2018). Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review. *Structures*, 16, 317-326.
- [3] Fahimi Farzam, M. and Ali Nejad, R. (2019). Evaluation of the seismic response of buildings by considering the dynamic soil-structure interaction with different layering of soil. [Online] pp. 1-8. Available at: <https://civilica.com/doc/1022441>.
- [4] Cavalieri, F. and Correia, A. and Crowley, H. and Pinho, R. (2020). Dynamic soil-structure interaction models for fragility characterisation of buildings with shallow foundations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 132, 106004.
- [5] Tabatabaiefar, H. R. and Fatahi, B. (2014). Idealisation of soil-structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 66, 339-351.
- [6] Torabi, H. and Rayhani, M. T. (2014). Three dimensional Finite Element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil. *Comput. Geotech.*, 60, 9-19.
- [7] Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000). Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental?. *J. Earthq. Eng.*, 4, 277-301.
- [8] Sharma, N. and Dasgupta, K. and Dey, A. (2020). Natural period of reinforced concrete building frames on pile foundation considering seismic soil-structure interaction effects. *Structures*, 27, 1594-1612.
- [9] Carbonari, S. and Dezi, F. and Leoni, G. (2012). Nonlinear seismic behaviour of wall-frame dual systems accounting for soil-structure interaction. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 41, 1651-1672.
- [10] Hokmabadi, A. S. and Fatahi, B. and Samali, B. (2014). Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations. *Comput. Geotech*, 55, 172-186.
- [11] Han, Y. (2002). Seismic response of tall building considering soil-pile-structure interaction. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 1, 57-64.
- [12] Zhang, W. and Seylabi, E. E. and Taciroglu, E. (2019). An ABAQUS toolbox for soil-structure interaction analysis. *Comput. Geotech.*, 114, 103143.
- [13] Engineering, E. and Dynamics, S. and Veletsos, A. S. and Meek, J. W. (1974). Dynamic behaviour of building-foundation systems. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 3, 121-138.
- [14] Fatahi, B. and Tabatabaiefar, S. H. R. and Far, H. (2014). Effects of Soil Plasticity on Seismic Performance of Mid-Rise Building Frames Resting on Soft Soils. *Adv. Struct. Eng.*, 17, 1387-1402.
- [15] Ghandil, M. and Behnamfar, F. (2017). Ductility demands of MRF structures on soft soils considering soil-structure interaction. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 92, 203-214.
- [16] Kaftan, O. S. and Toma-Sabbagh, T. and Weekes, L. and Augustus-Nelson, L. (2020). Validation of a finite element modelling approach on soil-foundation-structure interaction of a multi-storey wall-frame structure under dynamic loadings. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 131, 106041.
- [17] Liu, S. and Li, P. and Zhang, W. and Lu, Z. (2020). Experimental study and numerical simulation on dynamic soil-structure interaction under earthquake excitations. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 138, 106333.
- [18] Havaei, G. and izadparast, S. M. (2021). Effect of soil block thickness modelling on soil-structure interaction in dynamic responses of 15-storey high-rise buildings. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 301-316.
- [19] Zhang, X. and Far, H. (2022). Effects of dynamic soil-structure interaction on seismic behaviour of high-rise buildings. *Bull. Earthq. Eng.*, 20, , 3443-3467.
- [20] Fatahi, B. and Huang, B. and Yeganeh, N. and Terzaghi, S. and Banerjee, S. (2020). Three-Dimensional Simulation of Seismic Slope-Foundation-Structure Interaction for Buildings Near Shallow Slopes. *Int. J. Geomech.*, 20, 4019140.
- [21] Sun, JS. And Lee, KH. and Lee, HP. (2000). Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems. *J Mater process Technol* 2000., 105(1-2):110-8