

اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی در خاک‌های اشباع با لایه‌بندی مایل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

کد مقاله: ۳۲۰۲۷

محمد زارعی^{۱*}، وحید رستمی^۲

چکیده

در دینامیک سازه تعیین روش‌هایی برای تعیین تنش‌ها و تغییر مکان‌های سازه‌ای که تحت اثر بارهای دینامیکی مثل زلزله قرار دارد از اهم مسائل است. اما در حالت کلی سازه با خاک اطراف خود در حال اندرکنش است و بنابراین بار وارده به محیط خاک اطراف سازه در خلال تحریک زلزله باید در نظر گرفته شود. هدف از انجام این تحقیق اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی در خاک‌های اشباع با لایه‌بندی مایل می‌باشد. روش تحقیق این پژوهش از طریق آزمایشی می‌باشد. در مرحله تکمیل ساختمان، اثبات درستی محافظه‌کار بودن طراحی از طریق آزمایش‌ها در محل مطلوب خواهد بود. نتایج این آزمایش‌ها همچنین برای تنظیم فرا سنج‌های داده‌های سیستم قابل استفاده‌اند و بر اساس آن‌ها می‌توان درجه محافظه‌کار بودن طرح را از نظر کمی ارزشیابی کرد. برای تحلیل‌های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه از نرم‌افزار SASSI2000 استفاده شده است که این نرم‌افزار به روش تفکیک زیر سازه عمل می‌کند. در این مطالعه مدل ساختگاه از نظر هندسی شامل یک محیط خاکی ۴ لایه قرار گرفته بر روی نیم فضای الاستیک و سپس بر روی سنگ‌بستر می‌باشد. از نظر رفتاری سه نوع ساختگاه، مطابق تقسیم‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی لایه‌های خاک از المان‌های Plane Strain، موجود در کتابخانه نرم‌افزار استفاده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که در نظر گرفتن قاب‌های بتنی میان طبقه به‌صورت پایه ثابت در تحلیل‌های معمول، منجر به برآورد بیش از حد شتاب در درجات آزادی سازه می‌شود درحالی‌که رفتار واقعی این قاب‌ها به‌گونه‌ای دیگر است.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، سازه‌های بتنی، خاک‌های اشباع، خاک با لایه‌بندی مایل

۱- دانشجوی مهندسی عمران گرایش سازه-دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان (نویسنده مسئول)

Mzareii081@gmail.com

۲- استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان/رشته عمران

امروزه با گسترش تکنولوژی و شهرنشینی، پروژه‌های گسترده و وسیعی طراحی و اجرا می‌شوند که بعضی از این پروژه‌ها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شود. باگذشت زمان مقیاس و اندازه این پروژه‌ها افزایش می‌یابد و در این شرایط باتوجه به وضعیت‌های ناشناخته یا عوامل در نظر گرفته نشده، ضریب اطمینان طراحی و به تبع آن قیمت تمام‌شده پروژه افزایش می‌یابد. یکی از این عوامل، هنگامی که بار دینامیکی به سازه وارد می‌شود، اندرکنش خاک سازه است. (بابائی، ۱۴۰۱) در دینامیک سازه تعیین روش‌هایی برای تعیین تنش‌ها و تغییر مکان‌های سازه‌ای که تحت اثر بارهای دینامیکی مثل زلزله قرار دارد از اهم مسائل است. اما در حالت کلی سازه با خاک اطراف خود در حال اندرکنش است و بنابراین بار وارده به محیط خاک اطراف سازه در خلال تحریک زلزله باید در نظر گرفته شود. در تحلیل و بررسی رفتار لرزه‌ای یک سازه، تحریکی که از جانب زمین به سازه اعمال می‌شود برای حالتی که سازه بر زمین سخت و سنگ‌بستر متکی باشد همان تحریکی است که قبل از احداث سازه در آن نقطه پی وجود داشته است، اما در صورتی که سازه بر خاک نرم متکی باشد تغییرات مهمی در ورودی لرزه‌ای سازه رخ خواهد داد. در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه به طور دقیق ممکن است باعث افزایش دوره تناوب طبیعی و در نتیجه باعث کاهش ضریب زلزله در طراحی و متعاقباً کاهش هزینه‌ها گردد. در مقایسه با سازه، خاک دارای قلمرو نامحدودی است که شرایط انتشار امواج در آن باید در مدل دینامیکی به حساب آورده شود. در سال‌های اخیر کارهای زیادی روی اندرکنش دینامیکی سازه و خاک یا سنگ، برای انواع مختلف سازه انجام شده است. به‌ویژه برای سازه‌های حجیم و سنگین مثل نیروگاه‌های اتمی، سدها، سکوها ساحلی، پل‌ها و سازه‌های بلند که بر روی خاک نرم بنا شده‌اند اندرکنش بین سازه و پی بسیار مهم می‌باشد. (علی‌نژاد، ۱۴۰۰) عموماً سازه‌ها با فرض صلب بودن پی تحلیل لرزه‌ای می‌شوند و از اثر محیط خاکی بر پاسخ لرزه‌ای آن‌ها صرف‌نظر می‌گردد. این فرض در برخی مواقع منجر به تحلیل نادرست می‌شود در اغلب ساختمان‌ها مقدار برش پایه با در نظرگیری اندرکنش کاهش یافته و تغییر مکان طبقات افزایش می‌یابد. تغییر در پاسخ شتاب و طیف پاسخ باتوجه به خصوصیات سازه و خاک ممکن است سبب تقلیل یا تشدید شتاب شود. میرایی سیستم خاک و سازه اغلب از میرایی حالت پایه گیردار بیشتر است. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی هر نوع خاکی قبل از آغاز پروژه‌های عمرانی یکی از ملزومات مهم جهت طراحی دقیق‌تر و مقاوم‌سازی بیشتر است. خاک در سازه‌های زیرزمینی (تونل، کانال) به‌عنوان محیط ساخت، در اکثر سازه‌های سطحی (سد، پل، ساختمان، راه‌آهن، فرودگاه) به‌عنوان فونداسیون و در برخی از سازه‌ها (سد، ساختمان) به‌عنوان مصالح، مورد استفاده قرار می‌گیرد. وانی (۲۰۲۲) در تحقیقی تحت عنوان تأثیر اندرکنش سازه خاک بر پاسخ دینامیکی سازه‌های بتن مسلح در طی رویدادهای لرزه‌ای شدید، پاسخ دینامیکی سازه نه‌تنها تحت تأثیر رفتار روتنا، بلکه تحت تأثیر ماهیت و رفتار خاک موجود در داخل و اطراف زیر بنا قرار می‌گیرد. فرایند طراحی سازه معمولی معمولاً فرض می‌کند که پایه فونداسیون کاملاً مهار شده باشد، یعنی در یک شرایط ثابت. با این حال این فرض نادرست است؛ زیرا تأثیر انعطاف‌پذیری ارائه شده توسط تعامل خاک با سازه را نادیده می‌گیرد. هیچ توافق روشنی در مورد اثرات مفید یا مضر اندرکنش خاک - سازه (SSI) بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها وجود ندارد. هدف اصلی این مقاله بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه بر روی یک ساختمان چندطبقه (G + 10) است که بر روی یک پایه حصیر قرار دارد. ساختمان با استفاده از نرم‌افزار روش المان محدود (FEM) مدل‌سازی شده است و اندرکنش خاک - سازه با استفاده از رویکردهای (Winkler) و شبه جفت شده ترکیب شده است. یک مطالعه موردی برای درک پاسخ دینامیکی غیرخطی ساختمان با ظرفیت‌های باربری مختلف خاک انجام شده است. نتایج برحسب دوره اساسی، برش پایه و رانش طبقه نشان‌دهنده شده است. علاوه بر این، عملکرد خاک به‌عنوان تکیه‌گاه و خاک‌ریز نیز از اهمیت زیادی در مهندسی پل و راه‌سازی برخوردار است. لایه‌بندی خاک عبارت است از بررسی و شناخت لایه‌های مختلف خاک از سطح زمین تا عمق لازم شامل تعیین رنگ، بافت، میزان رطوبت، موقعیت سطح ایستایی نوسانات فصلی آن با استفاده از رنگ‌دانه‌ها، وجود مواد شیمیایی مهم از نظر هدایت هیدرولیکی خاک و تعیین موقعیت لایه‌های متراکم خاک و غیره... به‌منظور تعیین مشخصاتی که بر روی چگونگی ورود و حرکت آب در خاک تأثیر مهم و تعیین‌کننده دارد. (ناطق، ۱۳۹۹) در مهندسی ژئوتکنیک خاک با توزیع مواد معدنی و مواد مغذی خاک احیا و تقویت می‌شود. تقویت خاک در مناطقی که احتمال فرسایش زیاد است ضروری است. این امر به‌ویژه در مناطقی که دارای خاک نرم هستند بسیار مفید است زیرا نمی‌تواند پشتیبانی کافی از هر ساخت‌وساز یا ساختمان را ارائه دهد. ساختار پروفیل خاک زیر پی سازه‌ها بر روی رفتار دینامیکی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. پاسخ دینامیکی سازه به همراه روسازه و پی زیرین آن تحت لرزه‌های شدید اعمالی متغیری از نوع خاک زیر شالوده بوده؛ لذا بدون در نظر گرفتن تأثیر آن نمی‌توان تخمین واقع‌گرایانه‌ای از نیروهای اعمالی زلزله بر سازه داشت. (خان‌محمدی، ۱۳۹۸) همچنین خصوصیات محلی خاک مانند جنس خاک، لایه‌ای بودن خاک و نیز تغییرات عمق لایه از عوامل مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سازه می‌باشد که باید مورد بررسی قرار گرفته و نیز در تحلیل اندرکنشی سازه و پی لحاظ گردد؛ بنابراین و به نظر می‌رسد بررسی رفتار لرزه‌ای سازه بدون لحاظ نمودن اثر خاک منجر به نتایج واقعی نخواهد شد. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی انجام گرفته است تا این اثر دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد. گزارش‌های متعدد خسارات لرزه‌ای سازه‌ها از یک سو و نتایج تحقیقات تجربی - تحلیلی از سوی دیگر نشان می‌دهند که اثرات اندرکنش خاک سازه

می‌تواند عامل مؤثری در آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها باشد. بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال بررسی اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های بتنی در خاک‌های اشباع با لایه‌بندی مایل بود.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق این پژوهش از طریق آزمایشی می‌باشد. در مرحله تکمیل ساختمان، اثبات درستی محافظه‌کار بودن طراحی از طریق آزمایش‌ها در محل مطلوب خواهد بود. نتایج این آزمایش‌ها همچنین برای تنظیم فرا سنج‌های داده‌های سیستم قابل‌استفاده‌اند و بر اساس آن‌ها می‌توان درجه محافظه‌کار بودن طرح را از نظر کمی ارزیابی کرد. برای سازه‌های مهم تعیین مشخصات دستگاه عموماً شامل معین نمودن خواص ماکرو (ناحیه‌ای) و میکرو (محلی) می‌باشد. مشخصات ناحیه‌ای منطقه شامل تحقیقات زمین‌شناسی، لرزه‌شناسی و ژئوفیزیکی منطقه به‌منظور ارزیابی مشخصات لرزه‌ای محدوده و تعیین حرکات زمین برای طراحی است. مشخصات محلی منطقه شامل تحقیقات ژئوتکنیکی آزمایشگاهی و محیطی به‌منظور تعیین مشخصات دینامیکی خاک و دستگاه و ساختار سنگی و خواص مصالح آن می‌باشد. چنین تحقیقاتی عمدتاً شامل حفاری و نمونه‌برداری منطقه، طبقه‌بندی مواد، اندازه‌گیری‌هایی در محل سرعت موج‌های برشی و فشاری و آزمایش نمونه‌های خاک می‌باشند. برای ارزیابی تأثیرات خاک بر حرکات شدید زمین‌لرزه، مدول سکانت برشی، نسبت میرایی و چگالی جرمی خاک معمولاً موردنیاز هستند. خواص دینامیکی خاک در تغییر شکل‌های کوچک از اندازه‌گیری ژئوفیزیکی سرعت امواج فشاری و برشی به دست می‌آیند. اطلاعات باید بیانگر محدوده محلی سایت باشند. خواص دینامیکی خاک در محدوده‌هایی با تغییر شکل زیاد، بالای ۱٪، در آزمایشگاه با انجام آزمایش‌های دینامیکی بر روی نمونه‌های دست‌نخورده یا بازسازی شده خاک اندازه‌گیری می‌شوند. بیشتر روش‌های تحلیلی اندرکنش خاک - سازه که در حال حاضر اجرا می‌شوند از مراحل تحلیل خطی خاک استفاده می‌کنند. غیرخطی بودن خاک تقریباً با استفاده از تحلیل خطی معادل در نظر گرفته می‌شود. این عمل معمولاً با استفاده از معادل خطی مدول برشی و نسبت میرایی پسماند که هر دو تابعی از تغییر شکل برشی هستند انجام می‌گیرد. آزمایش‌های صحرائی لازم مورد استفاده در این تحقیق شامل آزمایش‌های ارتعاش واداشته، آزمایش‌های تحریک یا القای زمین‌لرزه، آزمایش‌های القای یا تحریک اعمال شده توسط انسان، آزمایش‌های ارتعاش محیطی و اندازه‌گیری‌های با مایکروتورمور می‌باشد. آزمایش‌های بارگذاری متناوب مانند آزمایش سه محوری، برش ساده و آزمایش‌های پیچشی برای محاسبه حلقه‌های پسماند، تغییر شکل تنش و فشار آب خرفه‌ای پدیدآمده مورد استفاده قرار می‌گیرند. از روی این حلقه‌ها مدول‌ها و نسبت‌های میرایی به دست می‌آیند. برای تحلیل‌های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه از نرم‌افزار SASSI2000 استفاده شده است که این نرم‌افزار به روش تفکیک زیر سازه عمل می‌کند. در این مطالعه مدل دستگاه از نظر هندسی شامل یک محیط خاکی ۴ لایه قرار گرفته بر روی نیم فضای الاستیک و سپس بر روی سنگ‌بستر می‌باشد. از نظر رفتاری سه نوع دستگاه، مطابق تقسیم‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی لایه‌های خاک از المان‌های Plane Strain، موجود در کتابخانه نرم‌افزار استفاده می‌شود.

۳- مبانی نظری تحقیق

اندرکنش خاک و سازه یکی از اصلی‌ترین مباحث در زمینه مهندسی زلزله است که در دهه‌های اخیر از لحاظ بین‌المللی به‌ویژه برای سازه‌های سنگین و حجیم مانند نیروگاه‌های اتمی، سکوه‌های ساحلی، پل‌ها و ساختمان‌های بلند مورد توجه جامعی قرار گرفته است. زلزله توسط آزادشدن انرژی در یک ناحیه بخصوص که در داخل پوسته زمین قرار دارد، ایجاد می‌شود. انرژی توسط امواج از منبع به تمام جهات منتشر می‌شود و با انتشار پدیده‌های مختلفی ایجاد می‌شود. انرژی امواج با انتشار از منبع و عبور از ناحیه همگن کاهش می‌یابد به‌علاوه ناپیوستگی مواد موجود در محیط باعث بازتاب و شکستگی امواج می‌گردد که می‌تواند باعث تغییر جهت دامنه و نوع موج می‌گردد. برای مدل‌کردن سیستم خاک و سازه روش‌های مختلفی وجود دارد. (cao, 2021) یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین این روش‌ها، روش وینکلر می‌باشد که در بین اکثر طراحان شناخته شده است. در روش وینکلر محیط خاک به‌صورت مجموعه‌ای از فنرهای یکسان الاستیک خطی که به‌صورت مجزا از هم در نظر گرفته شده مدل می‌شوند. در غالب مسائل اندرکنش خاک و سازه، محققان زیادی از روش (ACI 371R-98) بهره‌جسته‌اند. خاک یک محیط پیوسته بوده و ایجاد تغییر مکان در یک نقطه از آن باعث ایجاد تغییر مکان در نقاط دیگر نیز می‌شود، لذا مدل وینکلر به‌خوبی نمی‌تواند رفتار خاک را مدل کند. زیرا همان‌طور که گفته شد در مدل وینکلر، فنرها از هم مستقل‌اند و فقط در محل اثر بار تغییر شکل و تنش به وجود می‌آید. این امر محققین را به مدل نمودن خاک به‌صورت یک محیط پیوسته تشویق نمود. برای تحلیل محیط‌های پیوسته روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به روش اجزاء محدود اشاره کرد که از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. در این روش کل سیستم خاک و سازه به‌وسیله المان‌های محدود مدل می‌شوند. در روش اجزاء محدود می‌توان رفتار غیرخطی خاک را به‌راحتی مدل نمود. همچنین می‌توان اثر لایه‌بندی خاک در جهات افقی و عمودی را در نظر گرفت. معمولاً از اثرات اندرکنش خاک و سازه در

طراحی سازه‌های مرسوم، چشم‌پوشی می‌شود. (kamal, 2022) این امر اغلب باعث محافظه‌کارانه شدن طراحی می‌شود. اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های سنگین و سخت با پی‌های عمیق و یا سازه‌های که سیستم بار بر آن‌ها باعث سختی پی شده است بسیار مهم است. نیروگاه‌های هسته‌ای ساخته شده بر روی خاک از جمله سازه‌هایی هستند که اندرکنش خاک و سازه در آن‌ها اهمیت دارد. اثرات اندرکنش خاک و سازه مهم است و معمولاً نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه، مقررات ساختمان‌های مرسوم مقدار بار جانبی استاتیکی معادل را کاهش می‌دهند. در سازه‌های ویژه مثل نیروگاه‌های هسته‌ای، تحلیل بسیار پیچیده‌ای برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه انجام می‌شود. بر مبنای یک برداشت عمومی هر تحلیلی که در آن سازه و خاک به صورت هم‌زمان مورد بررسی واقع شوند، چه در شرایط استاتیکی باشند و چه در حالت دینامیکی، عنوان تحلیل اندرکنش خاک و سازه بر آن صدق می‌کند. بر این اساس تحلیل استاتیکی یک دیوار میخکوبی شده که در آن میخ‌ها و محیط خاکی اطراف به صورت توأم تحلیل می‌شوند، نوعی تحلیل اندرکنش خاک و سازه است. اما در تعبیر تخصصی و دقیق‌تر این عنوان فقط به تحلیل‌های دینامیکی اختصاص می‌یابد که در آن سازه و محیط خاکی به صورت یک سیستم یکپارچه تحت ارتعاش واقع می‌شوند و مودهای ارتعاشی همدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این حالت امواج لرزه‌ای از خاک به سازه منتقل می‌شوند و سازه را به ارتعاش درمی‌آورند. از سوی دیگر بازگشت امواج ناشی از ارتعاش سازه به درون زمین تنش‌های لرزه‌ای جدیدی در خاک ایجاد می‌کند. در صورتی که سازه‌ای بر روی یک لایه عمیق از خاک نرم که بر سنگ‌بستر قرار گرفته است در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود که پاسخ سازه کاملاً متفاوت از حالتی است که همان سازه بر روی یک لایه نازک از خاک نرم بر بستر سنگی قرار گرفته است. از سوی دیگر پاسخ سازه در هر دو حالت مذکور متفاوت از حالتی خواهد بود که سازه به طور مستقیم روی سنگ‌بستر قرار گرفته باشد. (kim, 2019) علاوه بر این نوع پی و خصوصیات هندسی و عمق کارگزاری آن نیز بر پاسخ لرزه‌ای سازه مؤثر خواهد بود. در هر حال در جریان انتشار امواج لرزه‌ای، سازه بر خاک اطراف خود تأثیر گذاشته و بر حرکت آن مؤثر خواهد بود. بر این اساس، برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های روزمینی و یا زیرزمینی در نظر گرفتن اثرات خاک بر پاسخ سازه به خصوص در شرایطی که خاک و پی از سختی زیادی برخوردار نیست، بسیار ضروری و با اهمیت است. برای سازه‌های بنا شده بر روی سنگ و خاک‌های خیلی سخت، تغییر پاسخ ناشی از اندرکنش کوچک و قابل‌صرف نظر است؛ بنابراین در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های روزمینی و زیرزمینی که با خاک‌های بسیار سخت در ارتباط هستند لزومی ندارد. در این حالت می‌توان از تحلیل پایه‌گیردار که در آن زمین به کلی صلب و گیردار فرض می‌شود، استفاده نمود. (عرفانی، ۱۴۰۰) اما در بسیاری از موارد تحلیل رفتار لرزه‌ای سازه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی خاک و سازه در مقایسه با تحلیل پایه‌گیردار متفاوت است و عدم در نظرگیری اثرات اندرکنش منجر به انحراف پاسخ‌ها از شرایط حقیقی خواهد شد. تأثیر اندرکنش دینامیکی خاک و سازه به خصوصیات هندسه، جرم، سختی و میرایی سازه و خاک وابسته است. در صورتی که فقط اثرات انعطاف‌پذیری زمین در تحلیل منظور شود و مسئله بازگشت امواج از سازه به زمین مورد نظر نباشد، از این تحلیل تحت عنوان اثر انعطاف‌پذیری پی یاد می‌شود.

۴- یافته‌ها

جدول ۱. مشخصات مکانیکی ساختگاه‌های مختلف

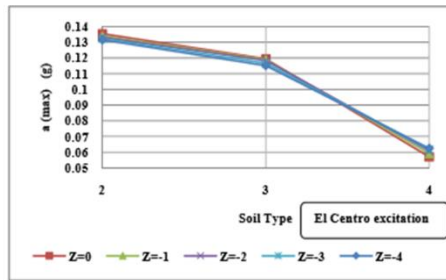
نوع خاستگاه	وزن حجمی (kg/m ³)	ضریب پواسون
II	۱۸۰۰	۰٫۳
III	۱۸۰۰	۰٫۳۳
IV	۱۷۰۰	۰٫۳۶

مشخصات مکانیکی سه نوع ساختگاه در جدول ۱ آورده شده است. به منظور تحریک ارتعاشی سیستم خاک و سازه، از ۶ رکورد زلزله استفاده شده است. حرکات کنترلی وارده به سیستم شامل رکورد شتاب زلزله‌های السنترو، آب بر، نورثریج، طیس، لوما پریتا و کوبه می‌باشند و مشخصات طیفی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

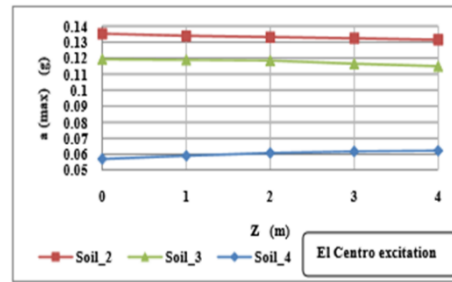
جدول ۲. مشخصات طیفی شش حرکت کنترلی استفاده شده

حرکت کنترلی	ایستگاه	زمان تداوم (SEC)	پریود غالب (SEC)	PGA (m/sec ²)	PGV (m/sec)	PGD (M)
Imperial valley	Elcentro	۲۴٫۱۰	۰٫۴۶	۰٫۹۸۰۶	۰٫۰۹۵	۰٫۰۴۱۶
Manjil	Ab bar	۲۹٫۱۰	۰٫۱۶	۰٫۹۸۰۶	۰٫۰۸۳۶	۰٫۰۶۵۸
Northridge	Castaic	۹٫۵۴	۰٫۵۴	۰٫۹۸۰۶	۰٫۱۰۱	۰٫۰۲۹۸
Tabas	Tabas	۱۶٫۴۸	۰٫۲۴	۰٫۹۸۰۶	۰٫۱۱۶۷	۰٫۰۴۶
Loma Prieta	Gilroy	۱۰٫۵۰	۰٫۲۰	۰٫۹۸۰۶	۰٫۰۸۳۳	۰٫۰۳۱۷
Kobe	Kokogawa	۱۳٫۱۴	۰٫۱۶	۰٫۹۸۰۶	۰٫۰۷۴۵	۰٫۰۲۲۲

نمودارهای زیر مربوط به قاب ۶ طبقه، مستقر بر سه نوع خاک و با انواع شرایط مدفونی است. Z بیانگر کد ارتفاعی زیر پی است.

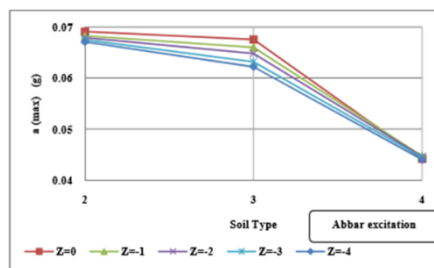


نمودار ۲. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم تر شدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی السترو

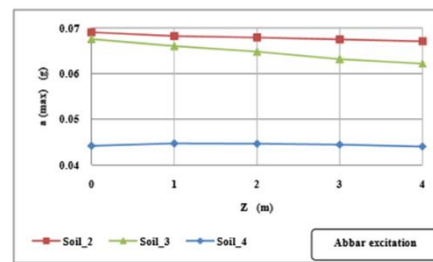


نمودار ۱. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی السترو

زمانی که نوع خاک زیر پی را ثابت در نظر بگیریم و مدفونی پی قاب‌های ۶ طبقه متغیر باشد، تغییرات شتاب ماکزیمم بام بسیار ناچیز بوده به طوری که بیشترین افزایش پاسخ برابر با ۳/۴۲٪ و مربوط به قاب ۶ طبقه مستقر بر خاک نوع IV و تبدیل شدن از حالت غیر مدفون به حالت ۱ متر مدفون و بیشترین کاهش پاسخ برابر با ۱٪ و مربوط به مدل مستقر بر خاک نوع II و تبدیل شدن از حالت غیر مدفون به حالت ۱ متر مدفون می‌باشد. حرکات کنترلی مورد بررسی، زلزله منجیل ایستگاه آب بر می‌باشد که در ادامه نتایج خروجی‌های تحلیل این رکورد آورده شده است.



نمودار ۴. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم تر شدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت آب بر

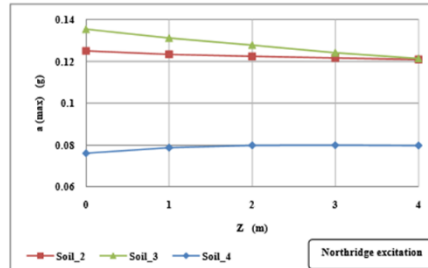
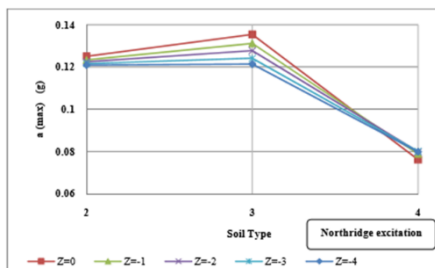


نمودار ۳. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی آب بر

جدول ۳. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ۶ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی آب بر

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	۷،۲۶٪ مربوط به ۴ متر مدفون	قاب	۳۴،۶٪ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	۶ طبقه	۲،۵۵٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

۱-۴- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی نورثریج



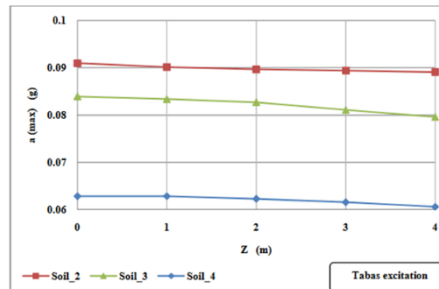
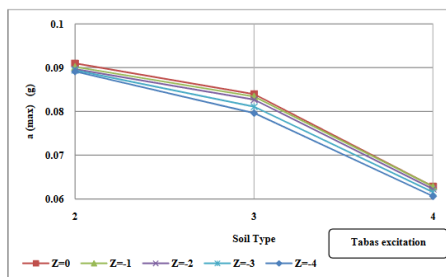
نمودار ۶. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم تر شدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت نورثریج

نمودار ۵. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی نورثریج

جدول ۴. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ۶ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی نورثریج

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	۷٫۶۶٪ مربوط به حالت غیر مدفون	قاب	۴۳٫۷۸٪ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	قاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	۳٫۳۶٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	۶ طبقه	۳٫۱۱٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

۲-۴- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی طبس



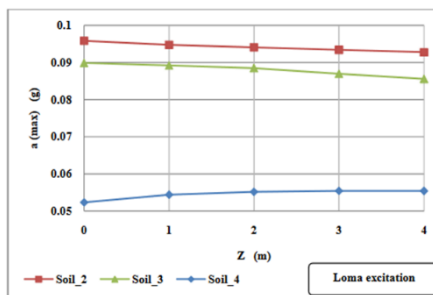
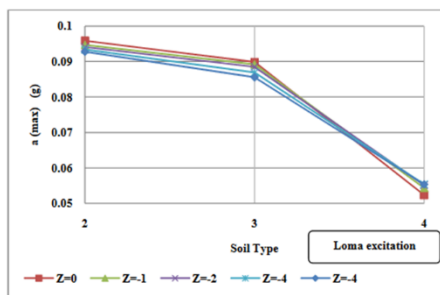
نمودار ۸. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم تر شدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت طبس

نمودار ۷. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی طبس

جدول ۵. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ۶ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی طبس

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	۱۰٫۶۶٪ مربوط به حالت غیر مدفون	قاب	۲۵٫۱۷٪ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	قاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	۰٫۰۵٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	۶ طبقه	۱٫۹۵٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

۳-۴- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی لوما پریتا



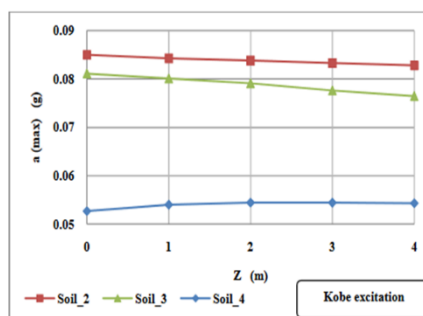
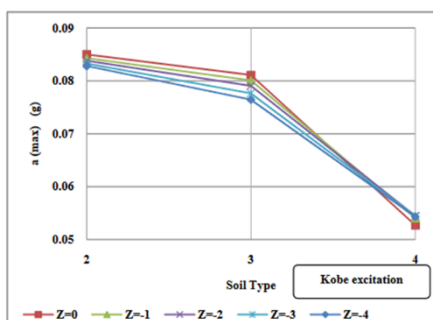
نمودار ۱۰. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم ترشدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت لوما پریتا

نمودار ۹. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی لوما پریتا

جدول ۶. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ۶ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی لوما پریتا

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	۷,۷۹٪ مربوط به حالت غیر مدفون	۴۱,۷۵٪ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	۳,۷۴٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	۱,۷۳٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

۴-۴- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی کوبه



نمودار ۱۲. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم ترشدن خاک) برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کوبه

نمودار ۱۱. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ۶ طبقه تحت حرکت کنترلی کوبه

جدول ۷. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ۶ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی کوبه

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	۷,۷٪ مربوط به حالت غیر مدفون	۳۵,۰۴٪ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	۲,۴۲٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	۱,۸۵٪ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

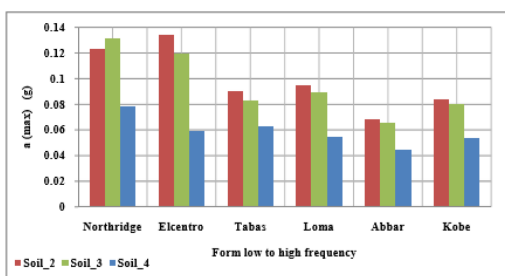
۴-۵- اثر افزایش بعد پی و فشار زیر پی بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتنی

جدول ۸. میانگین مقادیر درصد تغییر پاسخ لرزه‌ای (شتاب مرکز جرم بام) نسبت به افزایش بعد پی و فشار زیر آن

برای خاک‌های II و III و IV

نوع خاستگاه	درصد تغییر پاسخ با افزایش بعد از ۳۰ به ۴۰ متر	درصد تغییر پاسخ با افزایش بعد از ۴۰ به ۵۰ متر	درصد تغییر پاسخ با افزایش بعد از ۵۰ به ۶۰ متر
خاک نوع II	۱۰,۱۵٪ افزایش	۰,۴۵٪ کاهش	۲۵,۰۶٪ کاهش
خاک نوع III	۷,۳۶٪ کاهش	۷,۳٪ کاهش	۲۴,۹۸٪ کاهش
خاک نوع IV	۵,۵۸٪ کاهش	۲۵,۵۵٪ کاهش	۱۵,۳۵٪ افزایش

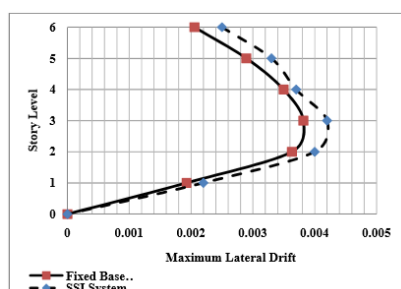
طبق نتایج جدول ۸ درمی‌یابیم که افزایش بعد پی و وزن‌تر شدن سیستم عموماً باعث کاهش پاسخ شتاب قاب‌های بتنی میان مرتبه، تحت شش حرکت کنترلی مورد بررسی در این تحقیق می‌شود. این روند در ۳ حالت افزایش بعد از ۳۰ به ۴۰ متر، افزایش بعد از ۴۰ به ۵۰ متر و افزایش بعد از ۵۰ به ۶۰ متر، قابل مشاهده است. در نتیجه به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای قاب‌های بتنی میان مرتبه، رابطه‌ای مستقیم با بعد پی و وزن سیستم دارد، به طوری که در بعضی موارد افزایش بعد تا ۳۵٪ پاسخ شتاب سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نمودار ۱۳ نتایج تحلیل‌های اندرکنشی را نسبت به تغییرات فرکانس تحریک (منظور از تغییرات فرکانس تحریک، تغییر رکورد زلزله یا همان حرکت کنترلی است) نشان می‌دهند.



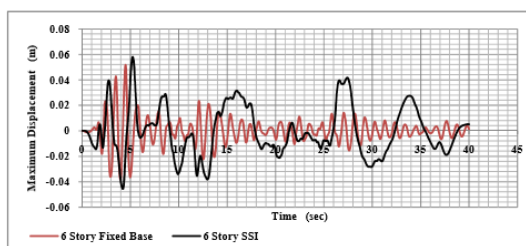
نمودار ۱۳. تغییرات ماکزیمم شتاب مرکز جرم بام قاب‌های بتنی ۶ طبقه تحت شش حرکت کنترلی، حرکات کنترلی بر اساس فرکانس غالب کم به فرکانس غالب زیاد

۴-۶- بررسی تغییرات جابه‌جایی در دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی

از آنجاکه نرم‌افزار SASSI2000 در ارائه خروجی‌ها دارای محدودیت‌هایی می‌باشد و تنها خروجی این نرم‌افزار پاسخ شتاب در گره‌های درخواستی است، لذا در این بخش نتایج فقط برای یک حرکت کنترلی ارائه می‌شوند. این بدان معناست که نتایج پیشرو جنبه کلی نداشته و فقط برای درک بهتر از تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ جابه‌جایی سیستم آورده شده است.



نمودار ۱۵. تغییرات ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات قاب ۶ تحت حرکت کنترلی السنترو در دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی



نمودار ۱۴. تغییرات تغییر مکان مرکز جرم بام قاب‌های بتنی ۶ طبقه مستقر بر خاک نوع IV در دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی، تحت حرکت کنترلی السنترو

۵- نتیجه‌گیری

طبق یافته‌های تحقیق تأثیر تغییرات پنج پارامتر عمق مدفونی، نوع خاک، بعد پی، فشار زیر پی و فرکانس غالب زلزله بر رفتار لرزه‌ای سیستم‌های اندرکنشی مورد ارزیابی قرار گرفت. ملاک ارزیابی برای این بررسی‌ها ماکزیمم شتاب مرکز جرم بام قاب‌های بتنی میان طبقه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که قبلاً عنوان شد، ۴ تیپ قاب بتنی مختلف از (نظر ارتفاع و وسعت بعد)

مستقر بر ۳ نوع خاک مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ همراه با ۵ حالت مدفونی (حالت غیر مدفون، ۱ متر مدفون تا ۴ متر مدفون) تحت ۶ حرکت کنترلی، مورد تحلیل اندرکنشی قرار گرفتند که در مجموع ۳۶۰ تحلیل انجام شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر هستند.

الف) نوع خاک زیرین، تأثیر بسیار زیادی بر پاسخ شتاب سیستم دارد، به نحوی که با تبدیل شدن خاک زیرین از نوع II به نوع III، درصد بیشترین افزایش پاسخ برابر با ۲,۴۲ درصد و با تبدیل شدن خاک نوع III به نوع IV درصد بیشترین کاهش پاسخ برابر با ۱,۸۵٪ است.

ب) پارامتر بعد پی نیز مهم بوده و قابل اغماض نیست، به طوری که می توان گفت افزایش این پارامتر تقریباً در تمامی مدل ها منجر به کاهش پاسخ شتاب گشته اند. در مواردی این تأثیر تا حدی است که با اضافه شدن ۱۰ متر به بعد پی، پاسخ ها حدود ۳۵٪ کاهش یافته اند.

ج) پارامتر فشار زیر پی نیز مانند بعد پی قابل اغماض نیست، به طوری که می توان گفت افزایش این پارامتر تقریباً در تمامی مدل ها منجر به کاهش پاسخ شتاب گشته اند. در مواردی این تأثیر تا حدی است که با اضافه شدن ۱۰ متر به بعد پی، پاسخ ها حدود ۳۵٪ کاهش یافته اند.

د) تأثیر فرکانس غالب زلزله بر قاب های بنتی میان طبقه به نحوی است که با افزایش آن، پاسخ شتاب مرکز جرم بام روندی نزولی دارد که میرایی توابع امیدانس پی برای این قاب ها بر سختی حاکم بوده و باعث کاهش شتاب و افزایش تغییر مکان می شود. (و) در نظر گرفتن قاب های بنتی میان طبقه به صورت پایه ثابت در تحلیل های معمول، منجر به برآورد بیش از حد شتاب در جرات آزادی سازه می شود در حالی که رفتار واقعی این قاب ها به گونه ای دیگر است.

منابع

۱. عرفانی، عمید، قنبری، علی و معصومی، علی (۱۴۰۰)، مجله زمین شناسی مهندسی. شماره ۵۸، ویژه نامه همایش لرزه خیزی و مهندسی زلزله استان البرز. صفحات ۵۸۱ تا ۵۷۴.
۲. قناد، م. ع. (۱۳۹۹) اثر برهم کنش خاک و سازه بر طراحی ساختمان ها در برابر زلزله. شماره هشتم، مجله زمین لرزه ۱۴-۲۰
۳. رضایی تبریزی ع (۱۴۰۰)، مطالعه اثر اندرکنش خاک سازه بر پاسخ غیرخطی سازه های بلند، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله
۴. حسینی، س. م. و یوسف پور ف و سیناییان ف و، کریمی ک و آقایی ارایی، ع. (۱۳۹۸) اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه های سنگین و نیمه مدفون، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مؤسسه آموزش عالی خاوران مشهد - ۱۹ و ۲۰ بهمن
۵. خان محمدی، خ، غیرتمند چ، تاریخچه، س. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر نوع خاک و هندسه سازه بر روی رفتار سازه های فولادی با لحاظ کردن اندرکنش خاک و سازه بر مبنای آیین نامه ۲۸۰۰. دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران نقش فن آوری های نوین در کاهش آسیب پذیری ناشی از حوادث غیرمترقبه
۶. ناطقی الهی ف رضایی تبریزی، ع و بهنام فر، ف. (۱۳۹۹). مطالعه اثر اندرکنش سازه خاک - سازه بر پاسخ غیرخطی سازه های بلند، نشریه دانشکده مهندسی، سال پانزدهم، شماره اول
۷. بابائی، ا. ح. (۱۴۰۱) بررسی اندرکنش خاک و سازه در ارتباط با طیف های بازتاب آئین نامه ای سمینار کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی، تهران
۸. علی نژاد، م. (۱۴۰۰) بررسی فصل چهار دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود. سمینار کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله تهران
9. Wani, Faisal Mehraj. Vemori, Jayaprakash (2022) Effect of soil structure interaction on the dynamic response of reinforced concrete structures.
10. Cao, Vui Van (2021). External GFRP confinement to decrease near-fault earthquake damage of reinforced concrete structures considering soil-structure interaction.
11. Kamal, Muhammet. Inel, Mehmet (2022). Seismic behavior of mid-rise reinforced concrete adjacent buildings considering soil-structure interaction.
12. Stewart, j.p. Seed, R.B. Fenves, G.L. (2020). Empirical evaluation of internal soil-structure interaction effects. Peer 98107.
13. Kim, S., and Roesset, J. M. (2019). Effect of nonlinear soil behavior on inelastic seismic response of a structure. Int. J. Geomech., 4_2_, 104-114.
14. El Ganainy, H., El Naggar, M.H. (2018). Seismic performance of three-dimensional frame structure. Lnt. J. Geomech., 4_2_, 104-114.

