نشریه علمی-تخصصی
پژوهش های نوین علوم مهندسی
ISSN: 2538-3809
سال هشتم، شماره ۵ (پیاپی: ۴۶)، زمستان ۱۴۰۲

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

محمد زارعی[1*]، وحید رستمی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰
کد مقاله: ۳۲۰۲۷

چکـیده

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 می باشد. 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 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 درنظرگرفتن 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.

واژگـان کلـیدی: 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

۱- مقدمه

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 باتوجه‌به وضعیت‌های ناشناخته یا عوامل در نظر گرفته نشده، ضریب اطمینان طراحی و به‌تبع آن قیمت تمام‌شده پروژه افزایش می‌یابد. یکی از این عوامل، هنگامی‌که 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 درصورتی‌که سازه بر خاک نرم متکی باشد تغییرات مهمی در ورودی لرزه‌ای سازه رخ خواهد داد. درنظرگرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه به طور دقیق ممکن است باعث افزایش دوره تناوب طبیعی و درنتیجه 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 به‌حساب آورده شود. در سال‌های اخیر کارهای زیادی روی اندرکنش دینامیکی سازه و خاک یا سنگ، برای انواع مختلف سازه انجام‌شده است. به‌ویژه برای سازه‌های حجیم و سنگین مثل نیروگاه‌های اتمی، سدها، سکوهای 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 کاهش‌یافته و تغییر مکان طبقات افزایش می‌یابد. تغییر در پاسخ شتاب و طیف پاسخ باتوجه‌به 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، مورداستفاده 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 تحت‌تأثیر رفتار روبنا، بلکه تحت‌تأثیر ماهیت و رفتار خاک موجود در داخل و اطراف زیر بنا قرار می‌گیرد. فرایند طراحی سازه معمولی معمولاً فرض می‌کند که پایه فونداسیون کاملاً مهارشده باشد، یعنی در یک شرایط ثابت. بااین‌حال 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 یک‌پایه 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 ترکیب‌شده 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 نشان‌داده‌شده 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. (ناطقی، 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 درنظرگرفتن 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 قرارگرفته و نیز در تحلیل اندرکنشی سازه و پی لحاظ گرد؛ 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 انجام‌گرفته 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 ارزشیابی کرد. برای سازه‌های مهم تعیین مشخصات ساختگاه 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 ساختگاه 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. غیرخطی‌بودن 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 صحرایی لازم مورداستفاده 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 مایکروترمور می‌باشد. آزمایش‌های بارگذاری متناوب مانند آزمایش سه محوری، برش ساده و آزمایش‌های پیچشی برای محاسبه حلقه‌های پسماند، تغییر شکل تنش و فشار آب حفره‌ای پدیدآمده مورداستفاده 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 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.

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، سکوهای ساحلی، پل‌ها و ساختمان‌های بلند موردتوجه 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) بهره جسته‌اند. خاک یک محیط پیوسته بوده و ایجاد تغییر مکان در یک نقطه از آن باعث ایجاد تغیر 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 اجزا 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 معمولانمی توان از آن چشم‌پوشی کرد. برای درنظرگرفتن 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 درنظرگرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه انجام می‌شود. بر مبنای یک برداشت عمومی هر تحلیلی که در آن سازه و خاک به‌صورت 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. براین‌اساس تحلیل استاتیکی یک دیوار میخکوبی شده که در آن میخ‌ها و محیط خاکی اطراف به‌صورت 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 به‌صورت یک سیستم یکپارچه تحت ارتعاش واقع می‌شوند و مودهای ارتعاشی همدیگر را تحت‌تأثیر 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. درصورتی‌که سازه‌ای بر روی یک‌لایه 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 یک‌لایهٔ 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. درهرحال در جریان انتشار امواج لرزه‌ای، سازه بر خاک اطراف خود تأثیر گذاشته و بر حرکت آن مؤثر خواهد بود. براین‌اساس، برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های روزمینی و یا زیرزمینی درنظرگرفتن اثرات خاک بر پاسخ سازه به‌خصوص در شرایطی که خاک و یا پی از سختی زیادی برخوردار نیست، بسیار ضروری و بااهمیت 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 پایه گیردار که در آن زمین به‌کلی صلب و گیردار فرض می‌شود، استفاده نمود. (عرفانی، ۱۴۰۰) اما در بسیاری از موارد تحلیل رفتار لرزه‌ای سازه با درنظرگرفتن اثرات اندرکنشی خاک و سازه در مقایسه با تحلیل پایه گیردار 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. درصورتی‌که فقط اثرات انعطاف‌پذیری زمین در تحلیل منظور شود و مسئله بازگشت امواج از سازه به زمین موردنظر نباشد، از این تحلیل تحت عنوان اثر انعطاف‌پذیری پی یاد می‌شود.

۴-یافته‌ها

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، طبس، لوما پریتا و کوبه می‌باشند و مشخصات طیفی آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

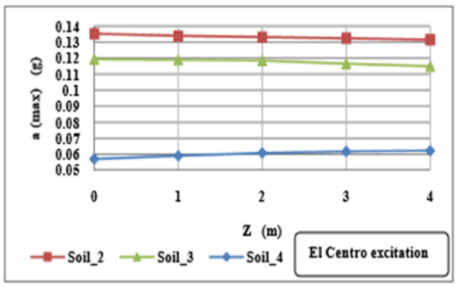
جدول۱. مشخصات مکانیکی ساختگاه های مختلف

نوع خاستگاه	وزن حجمی (kg/m3)	ضریب پواسون
II	۱۸۰۰	۰,۳
III	۱۸۰۰	۰,۳۳
IV	۱۷۰۰	۰,۳۶

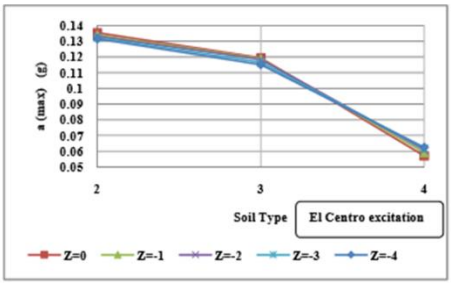
جدول ۲. مشخصات طیفی شش حرکت کنترلی استفاده شده

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	۰,۰۲۳۲

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.

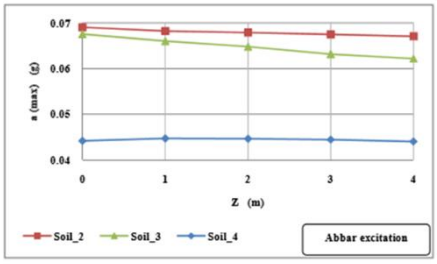


نمودار ۱.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی السنترو

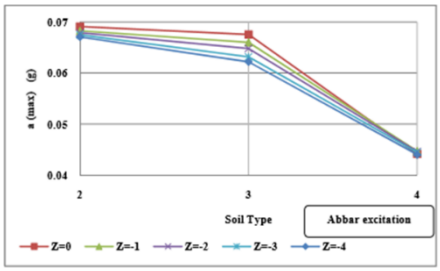


نمودار ۲.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم‌تر شدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی السنترو

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 به‌طوری‌که بیشترین افزایش پاسخ برابر با ٪ ۳/۴۲ و مربوط به قاب ۶ طبقه مستقر بر خاک نوع IV و تبدیل‌شدن 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 تبدیل‌شدن 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 ۳.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی آب بر

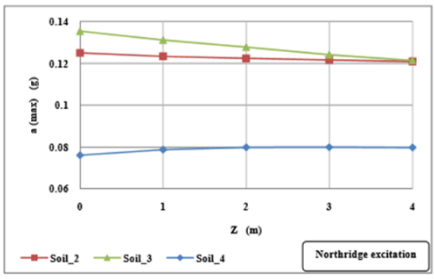


نمودار ٤.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم‌تر شدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت آب بر

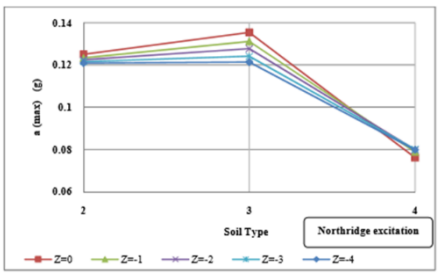
جدول ۳.مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ٦ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی آب بر

قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	٪۷,۲۶ مربوط به ۴ متر مدفون	٪۳۴,۶ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	٪۱,۲۱ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	٪۲,۵۵ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

۴-۱- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی نورثریج



نمودار ۵. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی نورثریج

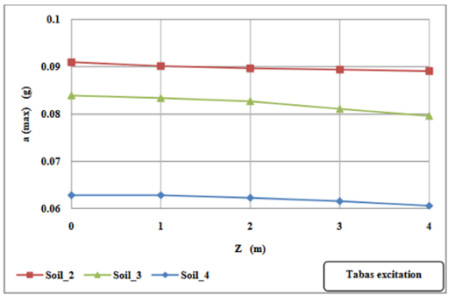


نمودار ٦.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم‌تر شدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت نورثریج

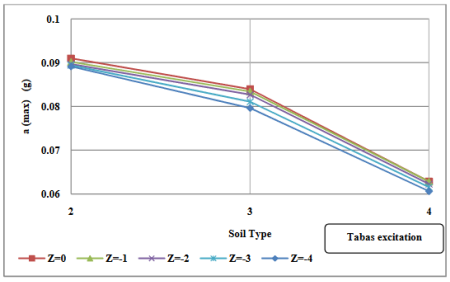
جدول٤. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ٦ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی نورثریج

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

۴-۲- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی طبس



نمودار ۷.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی طبس

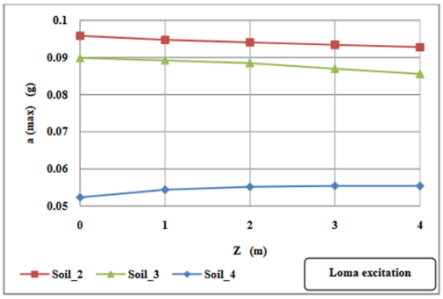


نمودار۸.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم‌تر شدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت طبس

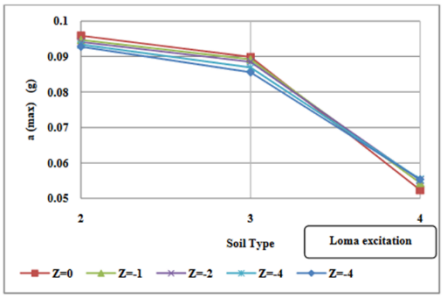
جدول ۵. مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ٦ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی طبس

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

۴-۳- نتایج تحلیل تحت حرکت کنترلی لوما پریتا



نمودار ۹. تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی لوما پریتا

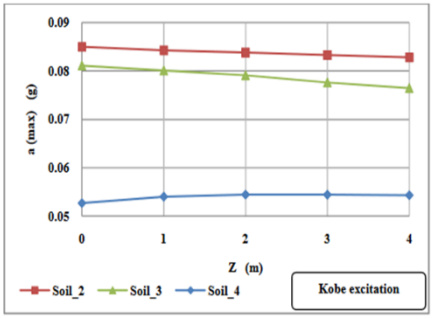


نمودار ۱۰.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم ترشدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت لوما پریتا

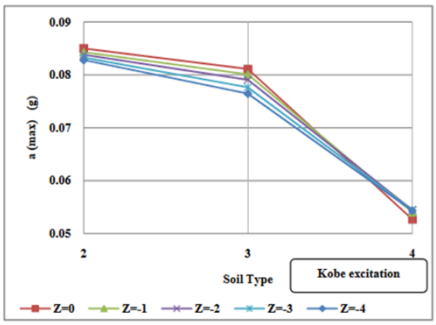
جدول٦.مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ٦ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی لوما پریتا

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 ۱۱.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به افزایش عمق مدفونی برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کنترلی کوبه



نمودار۱۲.تغییرات شتاب ماکزیمم مرکز جرم بام نسبت به تغییرات نوع خاک (نرم ترشدن خاک) برای قاب ٦ طبقه تحت حرکت کوبه

جدول ۷.مقادیر کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب ٦ طبقه نسبت به تغییرات نوع خاک در مدفونی ثابت و نسبت به تغییرات عمق مدفونی تحت حرکت کنترلی کوبه

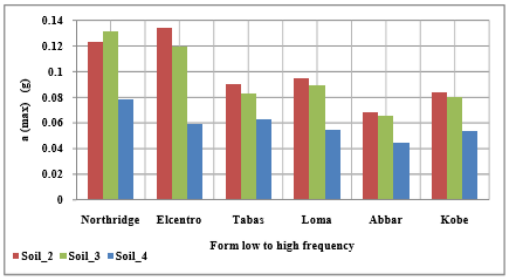
قاب	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک II به III	درصد کاهش پاسخ یا تبدیل شده خاک III به IV
۶ طبقه	٪۷,۷ مربوط به حالت غیر مدفون	٪۳۵,۰۴ مربوط به حالت غیر مدفون
قاب	درصد بیشترین افزایش پاسخ شتاب	درصد بیشترین کاهش پاسخ شتاب
۶ طبقه	٪۲,۴۲ مربوط به سازه مستقر بر خاک نوع IV	٪۱,۸۵ مربوط به سازه مستقر بر خاک III

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 تغیر پاسخ با افزایش بعد از ۴۰ به ۵۰ متر	درصد تغیر پاسخ با افزایش بعد از ۵۰ به ۶۰ متر
خاک نوع II	٪۱۰,۱۵ افزایش	٪۰,۴۵ کاهش	٪۳۵,۰۶ 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

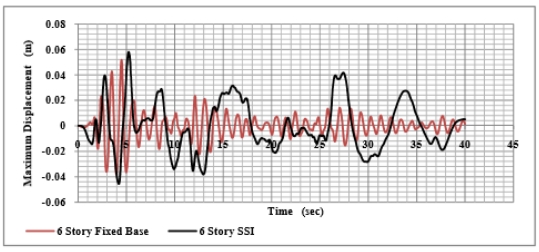
طبق نتایج جدول ۸ درمی‌یابیم که افزایش بعد پی و وزین‌تر شدن سیستم عموماً باعث کاهش پاسخ شتاب قاب‌های بتنی میان مرتبه، تحت شش حرکت کنترلی مورد بررسی در این تحقیق می‌شود. این روند در ۳ حالت افزایش بعد از ۳۰ به ۴۰ متر، افزایش بعد از ۴۰ به ۵۰ متر و افزایش بعد از ۵۰ به ۶۰ متر، قابل‌مشاهده است. در نتیجه به نظر می‌رسد که درنظرگرفتن اندرکنش خاک و سازه برای قاب‌های بتنی میان مرتبه، رابطه‌ای مستقیم با بعد پی و وزن سیستم دارد، به‌طوری‌که در بعضی موارد افزایش بعد تا ٪ ۳۵ پاسخ شتاب سازه را تحت‌تأثیر 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.



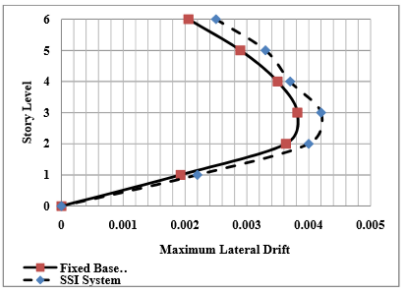
نمودار ۱۳. تغییرات ماکزیمم شتاب مرکز جرم بام قاب‌های بتنی ٦ طبقه تحت شش حرکت کنترلی، حرکات کنترلی بر اساس فرکانس غالب کم به فرکانس غالب زیاد

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

ازآنجاکه 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 ١٤.تغییرات تغییر مکان مرکز جرم بام قاب‌های بتنی ٦ طبقه مستقر بر خاک نوع IV در دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی، تحت حرکت کنترلی السنترو



نمودار١٥.تغییرات ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات قاب ٦ تحت حرکت کنترلی السنترو در دو حالت پایه ثابت و اندرکنشی

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 به‌دست‌آمده به شرح زیر هستند.

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

ب) پارامتر بعد پی نیز مهم بوده و قابل‌اغماض نیست، به‌طوری‌که می‌توان گفت افزایش این پارامتر تقریباً در تمامی مدل‌ها منجر به کاهش پاسخ شتاب گشته‌اند. در مواردی این تأثیر تا حدی است که با اضافه‌شدن ۱۰ متر به بعد پی، پاسخ‌ها حدود ٪ ۳۵ کاهش‌یافته‌اند.

ج) پارامتر فشار زیر پی نیز مانند بعد پی قابل‌اغماض نیست، به‌طوری‌که می‌توان گفت افزایش این پارامتر تقریباً در تمامی مدل‌ها منجر به کاهش پاسخ شتاب گشته‌اند. در مواردی این تأثیر تا حدی است که با اضافه‌شدن ۱۰ متر به بعد پی، پاسخ‌ها حدود ٪ ۳۵ کاهش‌یافته‌اند.

د) تأثیر فرکانس غالب زلزله بر قاب‌های بنتی میان طبقه به نحوی است که با افزایش آن، پاسخ شتاب مرکز جرم بام روندی نزولی دارد که میرایی توابع امپدانس پی برای این قاب‌ها بر سختی حاکم بوده و باعث کاهش شتاب و افزایش تغییر مکان می‌شود.

و) درنظرگرفتن قاب‌های بنتی 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.

منابع

۱. عرفانی، عمید، قنبری، علی و معصومی، علی (۱۴۰۰)، مجله زمین شناسی مهندسی. شماره ۵۸، ویژه‌نامه همایش لرزه‌خیزی و مهندسی زلزله استان البرز. صفحات ۵۸۱ تا۵۷۴.

۲. قناد، م. ع. (۱۳۹۹) اثر برهم‌کنش خاک و سازه بر طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. شماره هشتم، مجله زمین‌لرزه ۱۴–۲۰

۳. رضایی تبریزی ع (۱۴۰۰)، مطالعه اثر اندرکنش خاک سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۴. حسینی، س. م. و یوسف‌پور ف و سینائیان ف و ،کریمی ک و آقایی ارایی، ع. (۱۳۹۸) اثرات اندرکنش خاک و سازه در سازه‌های سنگین و نیمه مدفون، همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مؤسسه آموزش عالی خاوران مشهد – ۱۹ و ۲۰ بهمن

۵. خان‌محمدی، خ،غیرتمند چ تاریوردیلو، س. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر نوع خاک و هندسه سازه بر روی رفتار سازه‌های فولادی با لحاظ‌کردن اندرکنش خاک و سازه بر مبنای آیین‌نامه ۲۸۰۰. دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران نقش فن آوری‌های نوین در کاهش آسیب‌پذیری 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 سازه‌های بلند، نشریه دانشکده مهندسی، سال پانزدهم، شماره اول

۷. بابائی، ا. ح. (۱۴۰۱) بررسی اندرکنش خاک و سازه در ارتباط با طیف‌های بازتاب آئین‌نامه‌ای سمینار کارشناسی‌ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی، تهران

۸. علی‌نژاد، م، (۱۴۰۰) بررسی فصل چهار دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود. سمینار کارشناسی‌ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی 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.