

اثر جداسازهای پاندولی اصطکاکی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مستقر بر انواع خاکها

علیرضا جعفری^۱، هادی دشتی^{۲*} و علیرضا فیوض^۳

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۰۳ | <p>روش‌های مرسوم طراحی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای مبتنی بر افزایش ظرفیت سازه می‌باشند و ایجاد ظرفیت باربری در سازه با افزایش مقاومت و تأمین شکل‌پذیری آن صورت می‌گیرد که این امر در مقاوم‌سازی بسیاری از سازه‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. ولی در جداسازی لرزه ای با کاهش نیاز لرزه‌ای یعنی کاهش شتاب مطلق سازه و کاهش انرژی ورودی به سازه، در اثر افزایش زمان تناوب و میرایی موجود در تراز جداسازی می‌توان سازه را در محدوده ای ایمن قرار داد. از این رو در این مطالعه به بررسی اثر جداگرها و همچنین ارتفاع سازه‌های قرار گرفته بر انواع خاکها پرداخته شده است. به این منظور اثرات جداگرهای در دو ساختمان ۵ و ۸ طبقه در سه نوع خاک S1، S2 و S3 مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از اعتبار سنجی سازه و جداگر مطالعات رفتاری انجام و مشخص گردید حضور جداگرها سبب کاهش تا ۲۰ درصدی ماکزیمم جابجایی بام و ۸۰ درصدی ماکزیمم برش پایه در سازه ۵ طبقه می‌گردد. کاهش حدود ۴۰ درصدی ماکزیمم جابجایی لغزشی جداگر در سازه ۸ طبقه نسبت به ۵ طبقه، سبب کاهش اثر جداساز در جابجایی ماکزیمم در طبقات بالاتر گردیده است.</p> |
| پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۱ | |
| <p>واژگان کلیدی: جداگر لرزه‌ای، ارتفاع، اندرکنش خاک-سازه، روش عددی.</p> | |

۱- مقدمه

جداسازی لرزه‌ای عبارت است از جداکردن کل یا بخشی از سازه از زمین یا قسمت‌های دیگر سازه که به منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای آن بخش در زمان رویداد زلزله می‌باشد. روش مرسوم طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مبتنی بر افزایش ظرفیت سازه است. در این رویکرد طراحی لرزه‌ای، ایجاد ظرفیت باربری جانبی در سازه، با افزایش مقاومت و تأمین شکل‌پذیری آن صورت می‌گیرد. در نتیجه اجرای این روش، ابعاد اعضای سازه‌ای و اتصالات افزایش یافته و در سازه، اعضای مهاربند جانبی همچون بادبند یا دیوار برشی یا سایر اعضای سخت‌کننده در نظر گرفته می‌شود [۱].

دو گروه اصلی از جداسازهای لرزه‌ای برای کنترل نیروی منتقل شده به روسازه در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند: الف- استفاده از جداسازهای لاستیکی برای افزایش دوره تناوب طبیعی سازه. ب- استفاده از جداسازهای اصطکاکی و کنترل حداکثر نیروی منتقل شده به روسازه و استهلاک انرژی در محل جداساز.

در جداسازهای اصطکاکی ضریب اصطکاک مناسب عامل کنترل نیروی انتقالی به روسازه و همچنین کنترل تغییر مکان جانبی سازه خواهد بود. از سوی دیگر این نوع جداسازها ممکن است باعث انتقال ارتعاشات با

* پست الکترونیکی: h.dashti@iaubushehr.ac.ir

۱. گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲. گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

مناسب در سیستم‌های FPS، می‌توان سیستم FPS را طراحی کرد که نه تنها باعث ایجاد افزایش شکل‌پذیری سازه بلکه باعث ایجاد صرفاً حرکت صلب سازه به صورت رفت و برگشتی و برگشت سازه به نقطه شروع خواهد بود. نوراشرف الدین و توکلی [۶] تأثیر جداسازهای لرزه‌ای در قاب‌های بتنی در ارتفاع‌های متفاوت در حوزه دور و نزدیک زلزله را مورد مطالعه قرار دادند، بدین منظور از سه مدل ساختمانی ۳، ۸ و ۱۵ طبقه استفاده شد و در هر یک از مدل‌ها چهار نوع جداسازی در ارتفاع‌های متفاوت کار شد. نتایج نشان داد در سازه‌های بدون جداساز سطح عملکرد ایمنی جانی ارضاء نمی‌شود، ولی در سازه‌های جداسازی شده (در تمام حالات و ارتفاع‌های متفاوت) عملکرد سازه قابل قبول می‌باشد. حسینی و قوامی [۷]، به بررسی اندرکنش خاک و سازه‌های بتنی با قاب خمشی ویژه و دیوار برشی پرداختند. برای این منظور سازه‌ی یک ساختمان بتنی ۴، ۱۰ و ۱۶ طبقه با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی ویژه و دیوار برشی در ساختمانهای تیپ III و IV بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰، با همان سازه با فرض پای صلب (روی سنگ بستر) تحلیل، طراحی و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد رفتار غیرخطی خاک باعث تغییر پاسخ لرزه‌ای سازه می‌شود و وجود سازه، حرکت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خاک به سازه نیرو وارد می‌کند و سازه نیز به واسطه وزن و اینرسی، تغییرشکل‌های دیگری خواهد داشت. برخی از پژوهشگران نیز مسأله برخورد دو سازه مجهز به جداگر و همچنین نحوه آرایش جداگرها را بر میزان اتلاف انرژی بررسی نمودند [۸ و ۹]. قدرتی امیری و همکاران [۸]، اثر برخورد دو سازه مجاور با جداگر، تحت رکوردهای مختلف زلزله را بررسی و فاصله مناسب برای عدم برخورد دو سازه را پیشنهاد نمودند. حسینی واعظ و نادرپور [۹]، اثر نحوه آرایش جداگرهای مختلف در یک سازه را بررسی و با توجه به پاسخ هیستریزس، میزان اتلاف انرژی ساختمانها را بررسی و بهترین حالت آرایش جداگرها را ارائه نمودند. باندیوپادای و همکاران [۱۰]، به بررسی پاسخ لرزه‌ای دو سازه بتنی مجاور که یکی از آنها دارای جداگر است بر روی خاک پرداختند. آنها با نصب تجهیزاتی بر روی سازه، مطالعه خود را به صورت واقعی و سپس عددی مورد تحلیل قرار دادند. با بررسی نتایج مشخص گردید پاسخ شتاب سازه با جداگر حدود ۴ برابر بزرگتر از سازه معمولی است.

فرکانس‌های نسبتاً زیاد به سازه گردند. از این رو استفاده از این تجهیزات در جداسازی سازه‌هایی که ابزار دقیق و حساس به ارتعاش در فرکانس‌های بالا در آنها نصب خواهد شد باید با مطالعه‌ی دقیق صورت پذیرد. مسائل اقتصادی، اجرایی و دوام این تجهیزات در زمان طراحی و ساخت آنها باید مورد توجه قرار گیرد. جداسازی موفق یک سازه خاص، مستلزم انتخاب، طراحی و ساخت سامانه‌ی جداسازی مناسب برای آن است. علاوه بر تأمین انعطاف‌پذیری جانبی کافی و میرایی مناسب سامانه‌ی جداسازی باید قادر باشد تا پس از اتمام ارتعاش زلزله به وضعیت اولیه‌ی خود بازگردد. این سامانه‌ها باید سختی قائم زیادی برای جلوگیری از تاب خوردن و حرکت گهواره‌ای سازه و سختی اولیه‌ی کافی برای جلوگیری از حرکت‌های ناخواسته‌ی ناشی از وزش باد و لرزه‌های با دامنه‌های کم داشته‌باشند [۱۱].

تحقیقات مختلفی در خصوص تأثیر جداسازها توسط پژوهشگران انجام شده‌است. در پژوهشی به تأثیر جداسازهای پاندولی اصطکاکی در کاهش جابجایی بام نسبت به حالت بدون جداگر پرداخته‌شده و به عنوان یک مزیت این نوع جداسازه‌ها معرفی گردیده‌است [۲]. بزرگوار و کرم الدین [۳]، به بررسی کاربرد میراگر پاندولی اصطکاکی در قاب مهاربندی و تأثیر آن بر رفتار و پاسخ سازه پرداختند. نتایج حاصل نشان داد میراگر پاندولی اصطکاکی همانند میراگر اصطکاکی انرژی زیادی را مستهلک کرده به طوری که هیچ یک از مهاربندها تسلیم نگردیدند، در حالی که، در قاب مهاربندی معمولی تعدادی از مهاربندها تسلیم می‌شوند.

برخی محققان نیز تأثیر ارتفاع را در سازه‌های با جداگر مورد ارزیابی قرار داده‌اند. بابو و همکاران [۴]، اثرات جداساز لرزه‌ای را در دو سازه بتنی ۸ و ۱۶ طبقه بررسی نمودند و نتیجه گرفتند جابجایی نسبی طبقات با جداساز کمتر از حالت بدون جداساز است. رسول پور و موسوی قاسمی [۵]، به ارزیابی رفتار لرزه‌ای سیستم‌های جداگر پایه پاندولی اصطکاکی (FPS)، در سازه‌های بتن‌آرمه نامنظم پرداختند. در این پژوهش سازه‌های بتن‌آرمه نامنظم هندسی ۴، ۶ و ۱۵ طبقه جداسازی شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که، در انواع سازه‌های بتن‌آرمه منظم و نامنظم مجهز به سیستم‌های جداگر پایه پاندولی اصطکاکی (FPS)، با انتخاب شعاع انحناء و ضریب اصطکاک

نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک در کنترل سازه‌هایی که توسط وسایل کنترل فعال یا نیمه فعال کنترل می‌شوند بسیار مهم است. علوی و علیدوست [۱۵]، در مطالعه‌ای تحت عنوان "اثرات اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای ساختمان پایه جداشده" به بررسی اندرکنش خاک و سازه در ساختمان‌های مختلف بر روی خاک‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که اثرات اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های بلند بر روی خاک‌های نرم‌تر قابل توجه‌تر است. محمود و همکاران [۱۶]، در مطالعه‌ای تحت عنوان "شبیه‌سازی پاسخ ساختمان پایه جداشده تحت زلزله با توجه به انعطاف‌پذیری خاک" با مدل کردن انعطاف‌پذیری خاک با فنر و میراگر در زیر جداساز لرزه‌ای لاستیکی با هسته‌ی سربی و جداساز لرزه‌ای لاستیکی با میرایی زیاد، به این نتیجه رسیدند که استفاده از جداگر لاستیکی با میرایی زیاد باعث افزایش پاسخ سازه نسبت به جداساز لاستیکی با هسته‌ی سربی با لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌شود. کارابورک و همکاران [۱۷]، در مطالعه‌ای تحت عنوان "مقایسه اثر اندرکنش خاک و سازه بر سازه‌های جداسازی شده با سازه تکیه‌گاه صلب در خاک‌های نرم" به بررسی رفتار دینامیکی سازه جداسازی شده با جداساز لاستیکی با میرایی زیاد در خاک نرم پرداختند. نتایج نشان داد اندرکنش خاک و سازه یک عامل مهم در انتخاب جداکننده مناسب برای سازه‌های جداسازی شده بر روی خاک نرم است. اتریکه لوکو [۱۸]، در مطالعه‌ی تحت عنوان "اثر اندرکنش خاک و سازه بر جداساز لرزه‌ای" به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار غیرخطی جداساز برای یک سازه ساده الاستیک با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری خاک زیر آن پرداخت و به این نتیجه دست یافت که پاسخ لرزه‌ای سازه وقتی انعطاف‌پذیری خاک زیر آن لحاظ می‌گردد، ممکن است بزرگ‌تر از حالتی باشد که انعطاف‌پذیری خاک زیر آن لحاظ نمی‌شود. های یانگ و همکاران [۱۹]، در مطالعه‌ای تحت عنوان "آزمایش میز برای پاسخ لرزه‌ای یک سازه پایه جدا شده با اثرات اندرکنش خاک و سازه" به بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های پایه جدا شده بصورت آزمایشگاهی پرداخته و به این نتیجه دست یافتند که ضریب میرایی سیستم با لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه، بزرگ‌تر از سازه‌های جداسازی شده بر روی سطح صلب است.

تحقیقات نشان داده‌است که کارایی سیستم جداساز متأثر از خواص دینامیکی سازه‌های اصلی و همچنین ویژگی‌های تحریک ورودی بوده که این عوامل نیز خود وابسته به مشخصات خاک ساختگاه و اندرکنش خاک و سازه است. در حالت کلی اندرکنش بین خاک و سازه منجر به کاهش فرکانس غالب پاسخ و تغییر در میزان انرژی مستهلک شده می‌شود. بنابراین، اندرکنش خاک و سازه می‌تواند نقش مهمی را در پاسخ لرزه‌ای سازه ایفا کند، با این حال این اثرات اغلب در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها لحاظ نمی‌شود و تکیه‌گاه سازه به صورت صلب مدل می‌شود. در برخی تحقیقات محدود، پژوهشگران اثرات خاک را در پاسخ لرزه‌ای جداگرها مورد بررسی قرار دادند. بنیادی و همکاران [۱۱]، به ارزیابی عملکرد جداسازهای پایه بر کاهش پاسخ های لرزه‌ای سازه‌های بلند با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه پرداختند. بدین منظور یک سازه ۴۰ طبقه مدلسازی شد و اثر پارامترهای مختلف مدل جداساز پایه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای آن بررسی گردید. نتایج، عملکرد مناسب جداسازهای پایه را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های بلند و همچنین ضرورت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در ارزیابی رفتار لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها را نشان می‌دهند. ذاکری نژاد [۱۲]، به بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با در نظر گرفتن آثار اندرکنش خاک و سازه پرداختند. استفاده از جداسازی لرزه‌ای به منظور ارتقا مشخصات لرزه‌ای سازه‌ها و در نتیجه کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌ها در چند سال اخیر بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. اسپیراکوس و همکاران [۱۳]، در مطالعه‌ای تحت عنوان "اثرات اندرکنش خاک و سازه در ساختمان‌های پایه جداشده بر لایه خاک" به بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان چند طبقه جداشده بر روی یک لایه خاک الاستیک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اثرات اندرکنش خاک و سازه بر سازه‌ها با جرم کم‌تر و تعداد طبقات بیش‌تر بر روی خاک‌های نرم‌تر حائز اهمیت‌تر است. امینی و شادلو [۱۴]، اثر فرورفتگی فونداسیون را در کنترل سازه وارد کردند و با انتخاب ۴۸ مدل و ۳ رکورد زلزله، گستره وسیعی از اثرات اندرکنش را در مطالعات خود منظور نمودند. نتایج عددی نشان دادند که وارد کردن اثر اندرکنش در کنترل سازه منجر به آسیب‌های غیر قابل انتظاری می‌شود. بنابراین در

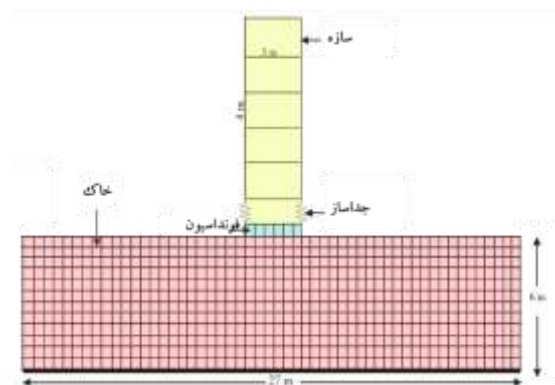
در این رابطه نیروی بازگرداننده ناشی از بلندشدن جرم بوده و عبارت دوم نیروی اصطکاک بین قسمت لغزنده و سطح برآمده می‌باشد. ضریب اصطکاک μ به مقدار فشار P و سرعت لغزش بستگی دارد [۲۲].



شکل ۱- سیستم آونگ اصطکاکی پاندولی [۲۲].

۲-۲- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق جهت مدلسازی از نرم افزار ABAQUS [۲۳]، استفاده می‌شود که یک نرم افزار اجزای محدود قوی برای حل مسائل جامدات بوده و قابلیت بالایی در شبیه‌سازی هندسه‌ی مدل‌های پیچیده دارد. این نرم‌افزار دارای المان‌های متعددی می‌باشد که بسته به مدل و نوع آنالیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. ابعاد هندسی خاک و محدوده پارامترهای مورد بررسی بر اساس مطالعه کریشنامورتی و آنیتا [۲۴]، در نظر گرفته شده‌است. در شکل (۲) مشخصات هندسی مدل مورد بررسی ارائه شده‌است.



شکل ۲- مشخصات هندسی مدل مورد بررسی [۲۴]

مدلسازی بصورت دوبعدی انجام گردیده‌است. در شکل (۳) المان‌های بکار برده شده در مدل‌سازی خاک و سازه نشان داده شده‌است. در مطالعه کریشنامورتی و آنیتا [۲۴]، فونداسیون با تعریف خصوصیات مصالح بتنی در حالت الاستیک تعریف شده‌است. بنابراین از این الگو برای تعریف بتن استفاده گردیده‌است. همچنین برای تعریف المان خاک از المان چهار گره‌ای کرنش مسطح استفاده شد. برای تعریف المان‌های سازه‌ای نیز از المان Beam استفاده شده‌است.

راجکومار و همکاران [۲۰]، تأثیر اندرکنش خاک- سازه و جداگر را روی شالوده‌های ماشین‌های ژنراتور پیپچی تحت زلزله‌های گوناگون بررسی نمودند. آنها ملاحظه کردند که تغییرات مقدار پیچش، فرکانس‌های طبیعی را تغییر می‌دهد. از طرفی با اضافه کردن جداگر، شتاب و جابجایی کاهش می‌یابد. جبینی اصلی و همکاران [۲۱]، اثرات نوع و عمق خاک بر امواج را بررسی کردند. برای این منظور سه نوع خاک تحت ۸ رکورد زلزله تحلیل و نتایج در قالب شبه شتاب و جابجایی دائمی خاک گزارش گردید. آنها نشان دادند افزایش ضخامت و نرم شوندگی خاک منجر به افزایش جابجایی دائمی سطح زمین می‌گردد.

با وجود تحقیقات صورت گرفته، بررسی اثر جداسازها با در نظرگرفتن اندرکنش خاک- سازه به روش مستقیم با تغییرات محتوای فرکانسی سازه‌ها در اثر تغییر ارتفاع آنها از بحث‌های چالش برانگیز در این خصوص می‌باشد. در این پژوهش با این دیدگاه پس از اطمینان از صحت مدلسازی، اثرات جداسازها بر روی سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مقدمه

سیستم آونگ اصطکاکی (FPS) سیستم جداسازی اصطکاکی است که بوسیله هندسه خاص خود، عمل لغزش و نیروی بازگرداننده را فراهم می‌کند. جداساز FPS، که بصورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده‌است، دارای یک قسمت لغزنده مفصلی است که بر روی یک سطح کروی از جنس فولاد ضدزنگ می‌لغزد. سطحی از این قسمت لغزنده مفصلی که در تماس با سطح کروی است با موادی با اصطکاک کم پوشیده شده‌است. سطح دیگر این لغزنده نیز کروی بوده و با لایه‌ای از فولاد ضدزنگ پوشیده شده‌است. با حرکت قسمت لغزنده از روی سطح کروی، جرم موجود از روی آن بلند شده که این امر سبب ایجاد نیروی بازگرداننده در سیستم می‌شود. اصطکاک بین سطح لغزنده مفصلی و سطح کروی نیز سبب ایجاد میرایی در جداسازها می‌شود [۲۲]. اگر بار وارده به یک جداساز FPS سیستم آونگ اصطکاکی W و تغییر مکان افقی آن D و ضریب اصطکاک μ باشد، آنگاه نیروی مقاوم F برابر است با:

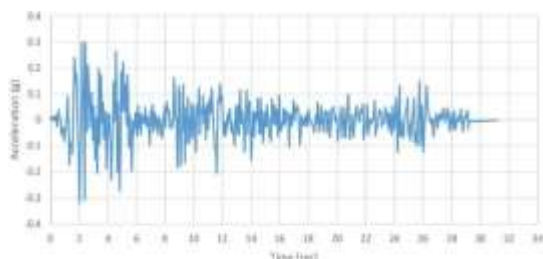
$$F = \frac{W}{R} D + \mu w (\text{sgn } D) \quad (1)$$

که در آن R شعاع انحنای صفحه کوژ می‌باشد. عبارت اول

جدول ۱- معرفی خصوصیات مصالح [۲۴]

| مصالح | E (kg/m ²) | μ | γ (kg/m ³) | ξ | K (kg/m) | C |
|----------|---------------------------|------|---------------------------|------|-------------|------|
| S1 | ۵*۱۰ ^۳ | ۰/۴ | ۱۸ | ۰/۰۵ | - | - |
| S2 | ۵*۱۰ ^۴ | ۰/۳۵ | ۱۹ | ۰/۰۵ | - | - |
| S3 | ۵*۱۰ ^۵ | ۰/۳ | ۲۰ | ۰/۰۵ | - | - |
| سنگ بستر | ۵*۱۰ ^۶ | ۰/۳ | ۲۰ | ۰/۰۵ | - | - |
| جداساز | - | - | - | - | ۱۵۰۰۰۰ | ۰/۰۵ |

که در آن نیروی ویسکوز در المان‌های جاذب انرژی، ρ دانسیته خاک، C_{se} سرعت موج برشی خاک و A سطح مقطع مرز جانبی خاک می‌باشد. ابعاد مش مورد استفاده برای خاک بر اساس مطالعه کریشنامورتی و آنیتا [۲۴]، در نظر گرفته شده است. همچنین مش از نوع مربعی می‌باشد. به منظور اعمال موج زلزله از تاریخچه شتاب حوزه دور زلزله السنترو ۱۹۴۰ از ایستگاه ۱۵۵۹ با فاصله از گسل ۶/۰۹ کیلومتر استفاده شده و به مدل اجزای محدود مورد مطالعه اعمال گردیده است. مدت زمان اعمال زلزله ۳۲ ثانیه می‌باشد و ماکزیمم شتاب زلزله برابر $g/۰.۳$ و در زمان $۲/۰.۲$ ثانیه بعد از شروع زلزله است. منحنی شتاب نگاشت این زلزله و مشخصات آن در شکل (۴) ارائه شده است.

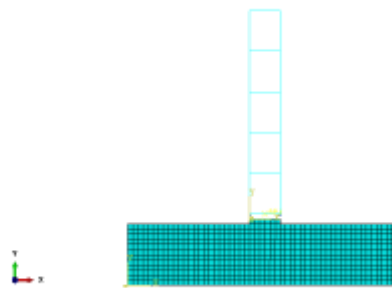


شکل ۴- شتابنگاشت زلزله السنترو [۲۷]

پس از مدل‌سازی سازه و محاسبه وزن سازه که معادل ۳۰۵ نیوتن می‌باشد جهت بدست آوردن سختی فنر جداساز با توجه به شعاع انحنای ۱ متری آن از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$K = m \cdot \frac{g}{R} \quad (۵)$$

که در آن m وزن سازه و R شعاعی انحنای جداساز و g نیروی گرانش می‌باشد. همچنین با توجه به ضریب اصطکاک جداساز لرزه‌ای پاندولی که معادل $۰/۰۵$ است، محاسبه حداقل نیروی برشی جهت وارد عمل شدن جداساز لرزه‌ای اصطکاکی به این شکل می‌باشد که با توجه به شکل (۵-ب)، تا زمانی که مقدار نیروی برشی از مقدار $\mu \cdot W$ که



شکل ۳- اجزای مدل‌سازی محیط خاک و سازه

مشخصات خاک در جدول ۱ برای حالت‌های مختلف (۱) تا (۷) ارائه گردیده است. در این جداول E مدول الاستیسیته، μ ضریب پواسون، γ وزن مخصوص خاک، ξ میرایی سازه، K سختی فنر، C ضریب اصطکاک در جداساز، Φ زاویه اصطکاک داخلی و ψ زاویه اتساع می‌باشند.

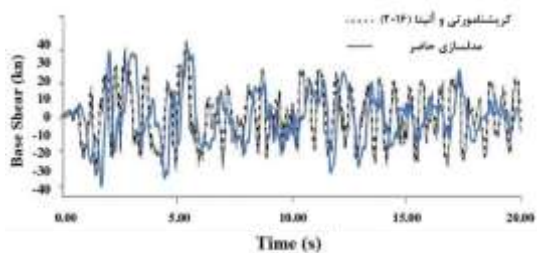
مدول الاستیسیته پی سازه $۲/۲۰ \times ۱۰^۷$ کیلونیوتن بر مترمربع، نسبت میرایی ۵ درصد در نظر گرفته شده است. میرایی مصالح در خاک عموماً از مشخصات ویسکوزیته، اصطکاک و توسعه پلاستیسیته ناشی می‌شوند. جهت انجام آنالیزهای خاک و سازه نیاز به ماتریس میرایی خاک است. ضرایب α و β ماتریس میرایی، مطابق روش رایلی و روابط زیر محاسبه شده است [۲۵]:

$$[c] = \alpha [m] + \beta [k] \quad (۲)$$

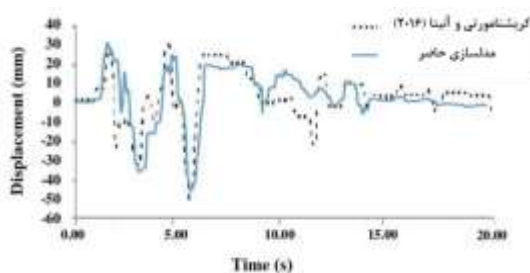
با توجه به نیمه بی‌نهایت بودن مدل واقعی، انرژی لرزه‌ای وارد شده به مدل بایستی از طریق مرزها خارج شود (میرایی هندسی). روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرز ویسکوز است. در این روش المان‌های میراگر در مرزهای جانبی قرار داده شده که ضریب این المان‌های میراگر از روابط زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$F_d = C_d \cdot \dot{u} \quad (۳)$$

$$C_d = \rho \cdot C_{se} \quad (۴)$$

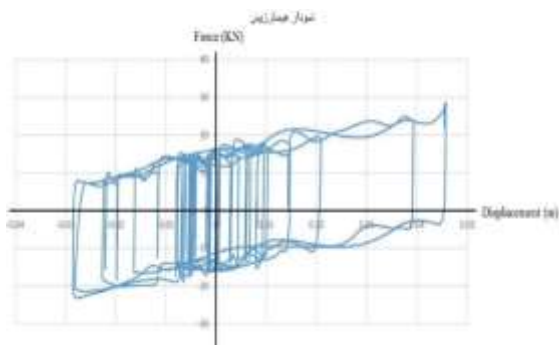


شکل ۶- مقایسه نمودار برش پایه در مدل کریشنمورتی و آیتا [۲۴] و مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده

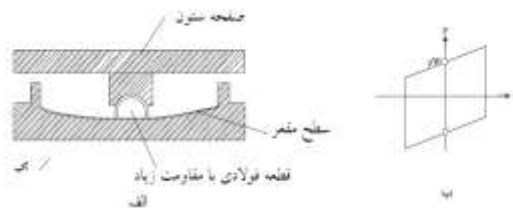


شکل ۷- مقایسه نمودار جابجایی لغزشی جداساز در برابر زمان در مدل کریشنمورتی و آیتا [۲۴] و مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده

مشاهده می‌گردد که، روند حرکتی هر دو مدل خیلی نزدیک به یکدیگر می‌باشند ضمن آنکه حداکثر مقادیر برش پایه و جابجایی لغزشی استخراج شده از نرم‌افزار ABAQUS [۲۳]، نزدیک به مقادیر حداکثری برش پایه و جابجایی لغزشی در مطالعه‌ی کریشنمورتی و آیتا [۲۴] می‌باشد، به‌طوریکه بیشترین مقدار برش پایه ۴۲/۱ کیلونیوتن و بیشترین مقدار برش پایه بدست آمده از نمودار صحت سنجی ۳۸/۳۶ کیلونیوتن می‌باشد که معادل با ۹/۷ درصد اختلاف و همچنین بیشترین جابجایی لغزشی برابر با ۵۰/۱ میلی‌متر و بیشترین جابجایی لغزشی بدست آمده از نمودار صحت سنجی برابر با ۴۵/۸۲ میلی‌متر می‌باشد که معادل با ۹/۳ درصد اختلاف می‌باشد.



شکل ۸- نمودار هیستریزاس جداساز لرزه‌ای شبیه‌سازی شده



شکل ۹- الف: نمای شماتیک جداساز لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی ب: نمودار نیرو در برابر جابجایی جداساز لرزه‌ای [۱]

معادل با ۱۵ کیلونیوتن می‌باشد تجاوز نکند، جداساز لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی وارد عمل نمی‌شود.

۲-۳- صحت سنجی روش اجزای محدود بکار رفته شده

در این قسمت به ارزیابی اعتبارسنجی روش اجزای محدود بکار برده‌شده در شبیه‌سازی مدل‌های مورد بررسی پرداخته شده‌است؛ به منظور اعتبارسنجی روش اجزای محدود مورد استفاده در شبیه‌سازی اثر اندرکنش پاندول‌های اصطکاکی از مطالعه‌ی عددی کریشنمورتی و آیتا [۲۴]، استفاده شده‌است. توده خاکی مورد بررسی دارای طول ۲۷ متر و ارتفاع ۶ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۴ متر می‌باشد و عرض دهانه‌ها نیز ۳ متر در نظر گرفته شده‌است. مقاطع تیرها به ابعاد ۰/۴۵×۰/۴۵ متر و ابعاد ستون‌ها با ابعاد ۰/۴۵×۰/۶۰ متر، میرایی برابر ۵ درصد در نظر گرفته شد. خاک مورد استفاده شامل سه تیپ S1، S2 و S3 می‌باشد که در این مطالعه از مشخصات خاک S2 جهت اعتبارسنجی استفاده شد. مشخصات پی شامل مدول الاستیسیته برابر $۲/۲۰ \times 10^7$ کیلونیوتن بر مترمربع ضریب پواسون برابر ۰/۱۵ و چگالی جرمی برابر $۲/۴ \text{ kNsec}^2/\text{m}^4$ در نظر گرفته شد. ابعاد مش‌بندی در المان‌ها برابر ۰/۵×۰/۵ متر در نظر گرفته شد. مدل تحت رکوردهای حاصل از زلزله السنترو در پایین شبکه خاک قرار گرفت. مشخصات هندسی مدل مورد بررسی در شکل (۳) نشان داده شده‌است. پس از شبیه‌سازی اجزای محدود مدل اشاره شده، خروجی‌های نمودار برش پایه در برابر زمان، جابجایی لغزشی جداساز (اختلاف جابجایی بالا و پایین جداساز) در برابر زمان و همچنین نمودار هیستریزاس جداساز لرزه‌ای استخراج گردید.

در نمودار شکل‌های (۶) و (۷) به مقایسه نتایج حاصل از مطالعه‌ی کریشنمورتی و آیتا [۲۴] و مدل شبیه‌سازی شده پرداخته شده‌است.

قالب نمودار جابجایی لغزشی جداساز در برابر زمان، نمودار جابجایی بام در برابر زمان و نمودار برش پایه در برابر زمان برای هر یک از حالت‌ها به صورت جداگانه ارائه شده است، در این مطالعه اثر نوع خاک، حضور جداساز و ارتفاع سازه در نتایج خروجی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- معرفی حالت‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر

| حالت | تعداد طبقه | اثر نوع خاک | اثر جداساز |
|------|-------------|---------------------|---------------------|
| ۱ | ۵ | خاک S1 | بدون جداساز |
| ۲ | | | با جداساز با سختی K |
| ۳ | | خاک S2 | بدون جداساز |
| ۴ | | | با جداساز با سختی K |
| ۵ | | | بدون جداساز |
| ۶ | خاک S3 | با جداساز با سختی K | |
| ۷ | | خاک S2 | با جداساز با سختی K |
| ۸ | بدون جداساز | | |

۳-۱- بررسی خروجی‌های حاصل از تحلیل مدل‌های

مورد بررسی

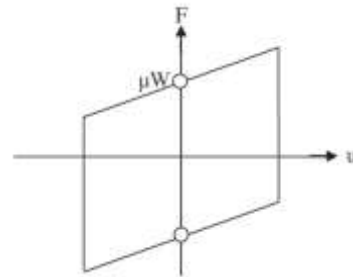
۳-۱-۱- حالت ۱

در شکل (۱۰) خروجی‌های مربوط به حالت اول نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S1 و بدون در نظر گرفتن جداساز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این حالت بیشینه جابجایی طبقه بام برابر ۲۲/۶۳ میلیمتر و بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر ۱۱۸/۵۶ کیلونیوتن می‌باشد.

۳-۱-۲- حالت ۲

در شکل (۱۱) خروجی‌های مربوط به حالت دوم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S1 و اثر جداساز که مقدار سختی آن برابر K می‌باشد، در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این حالت بیشینه جابجایی لغزشی برابر ۴۸/۸ میلیمتر، بیشینه جابجایی طبقه بام برابر ۲۲/۰۹ میلیمتر و بیشینه برش پایه ایجاد شده برابر ۲۷/۰۹ کیلونیوتن شده است.

همچنین در شکل (۸) منحنی هیستریزیس بار - جابجایی جداساز لرزه‌ای شبیه‌سازی شده ارائه گردیده است. مطابق با توضیحات ارائه شده در مطالعه کریشنا و آنیتا [۲۴] حداقل نیروی برشی جهت وارد عمل شدن جداساز لرزه‌ای از رابطه μW بدست می‌آید (شکل ۹) که در آن W وزن سازه و μ شکل پذیری می‌باشد. بر این اساس حداقل نیروی برشی جهت وارد عمل شدن جداساز لرزه‌ای برای مدل شبیه‌سازی شده در مطالعه کریشنا و آنیتا برابر ۱۵ کیلونیوتن و برای مدل شبیه‌سازی شده در مطالعه حاضر برابر ۱۶ کیلونیوتن شده است و دو مقدار در حدود ۶ درصد بایکدیگر اختلاف دارند. از این رو می‌توان بیان نمود که روش شبیه سازی اجزای محدود مورد استفاده در این مطالعه از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد.



شکل ۹- حداقل نیروی برشی جهت وارد عمل شدن جداساز لرزه‌ای [۲۴]

۲-۴- مطالعات پارامتری

۲-۴-۱- معرفی مدل‌های مورد بررسی

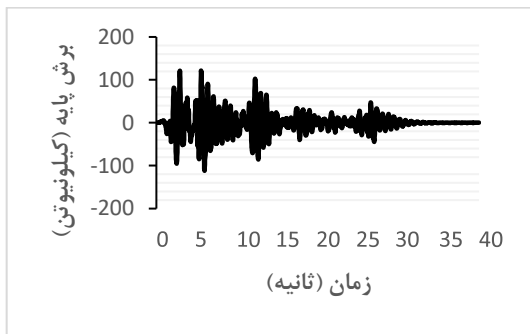
پس از معرفی برخی از قابلیت‌های نرم‌افزار ABAQUS [۲۳]، در این بخش به معرفی مدل‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود. متغیرهای مورد بررسی عبارتند از دو اثر با و بدون اندرکنش خاک-سازه (سنگ)، اثر سه نوع خاک (S1، S2 و S3) در مجموع ۸ مدل اجزای محدود با سازه ۵ و ۸ طبقه موجود در این مطالعه شبیه‌سازی می‌شود. سپس خروجی‌های بیشینه جابجایی بام و نیروهای برشی پایه و بیشینه جابجایی لغزشی جداگر، با فرض رفتار خاک به صورت الاستیک با دو ساختمان ۳ و ۸ طبقه بدست آمده تا تأثیر رفتار جداگر و ارتفاع سازه بر پاسخ کلی مجموعه استخراج گردد. حالت‌های اشاره شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

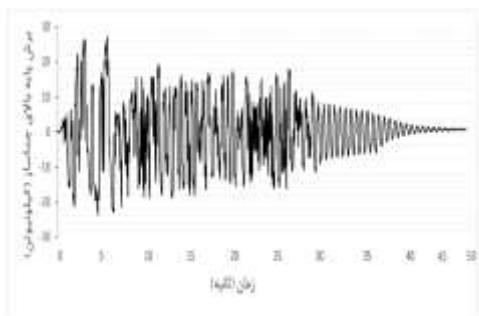
پس از شبیه‌سازی و تحلیل ساختمان‌های دارای سیستم جداگر لرزه‌ای پاندولی اصطکاکی نتایج حاصل از آن‌ها در

۳-۱-۳- حالت ۳

در شکل (۱۲) خروجی‌های مربوط به حالت سوم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، اثر در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S2 و بدون حضور جداساز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت بیشینه جابجایی طبقه بام برابر ۲۲/۶۸ میلی‌متر و بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر ۱۱۸/۵۶ کیلونیوتن می‌باشد.

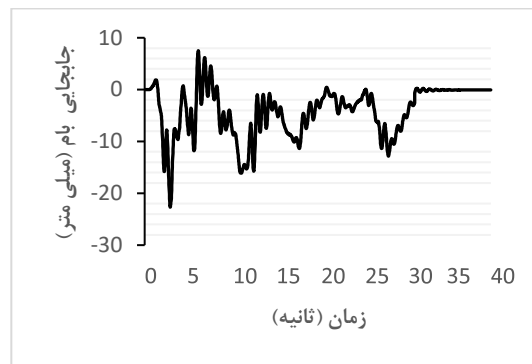


ب

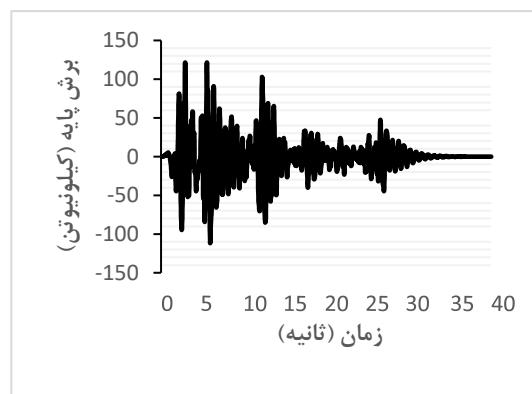


ج

شکل ۱۱- خروجی‌های مربوط به حالت دوم الف: جابجایی لغزشی ب: نمودار جابجایی طبقه بام ج: نمودار برش پایه -

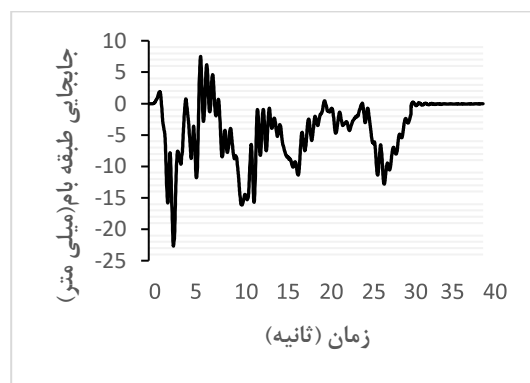


الف

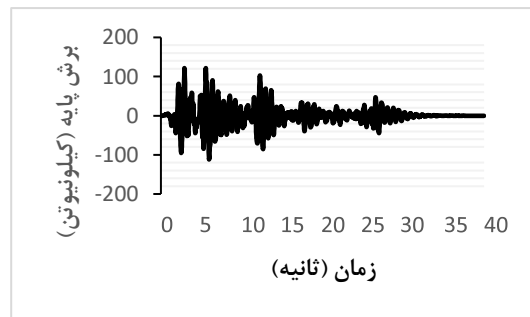


ب

شکل ۱۰- خروجی‌های مربوط به حالت اول الف نمودار جابجایی طبقه بام ب: نمودار برش پایه - زمان

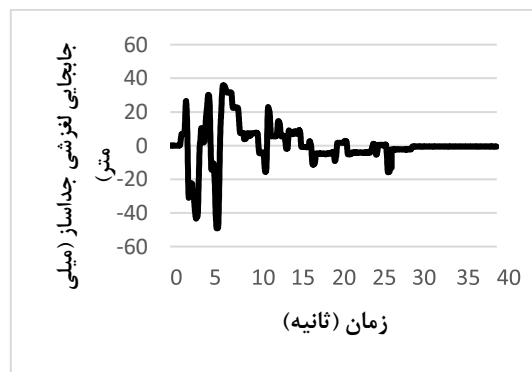


الف



ب

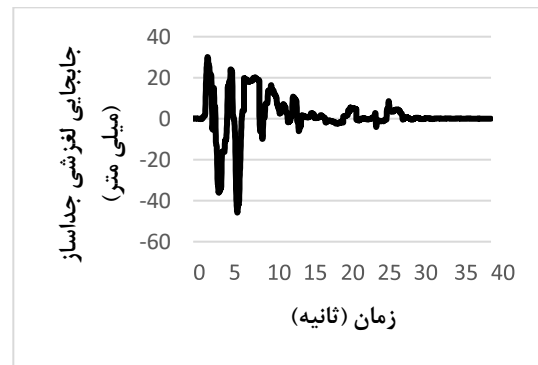
شکل ۱۲- خروجی‌های مربوط به حالت سوم الف: نمودار جابجایی طبقه بام ب: نمودار برش پایه - زمان



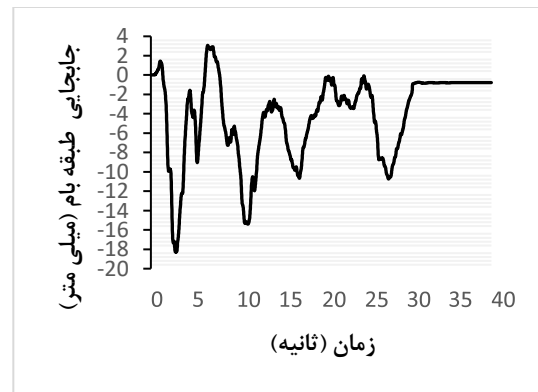
الف

۳-۱-۴- حالت ۴

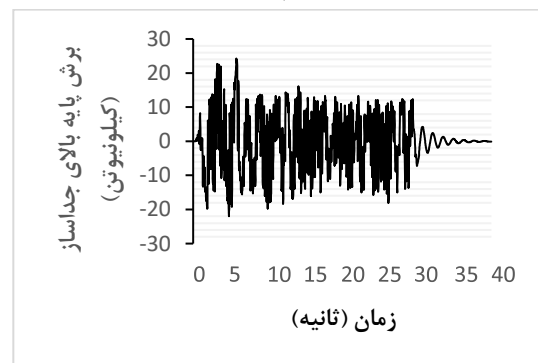
در شکل (۱۳) خروجی‌های مربوط به حالت چهارم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S2 و اثر جداساز با مقدار سختی برابر k می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت بیشینه جابجایی لغزشی جداساز برابر $۴۵/۷$ میلیمتر، بیشینه جابجایی طبقه بام ایجاد شده برابر $۱۸/۲۱$ میلیمتر و بیشینه برش پایه ایجاد شده برابر $۲۶/۵۸$ کیلونیوتن است.



الف



ب

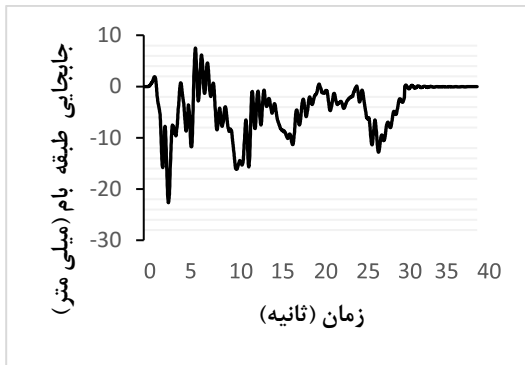


ج

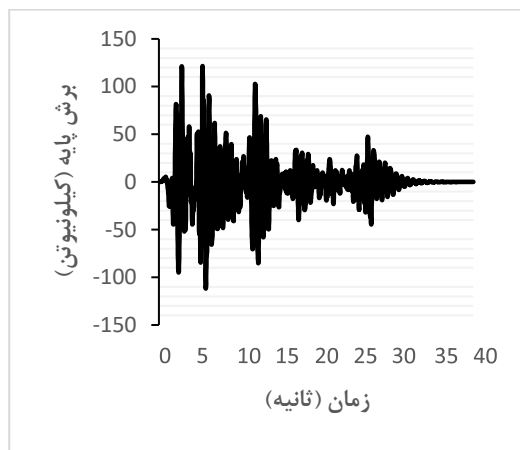
شکل ۱۳- خروجی‌های مربوط به حالت چهارم الف: جابجایی لغزشی ب: نمودار جابجایی طبقه بام ج: نمودار برش پایه - زمان

۳-۱-۵- حالت ۵

در شکل (۱۴) خروجی‌های مربوط به حالت پنجم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S3 و بدون حضور جداساز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت بیشینه جابجایی طبقه بام برابر $۲۲/۳۶$ میلیمتر و بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر $۱۲۱/۴۸$ کیلونیوتن می‌باشد.



الف



ب

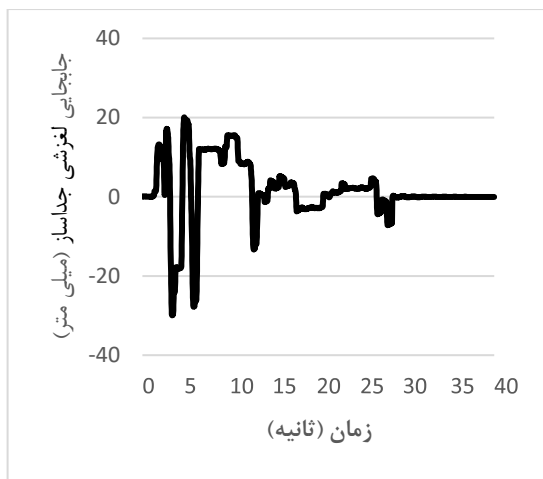
شکل ۱۴- خروجی‌های مربوط به حالت پنجم الف: نمودار جابجایی طبقه بام ب: نمودار برش پایه - زمان

۳-۱-۶- حالت ۶

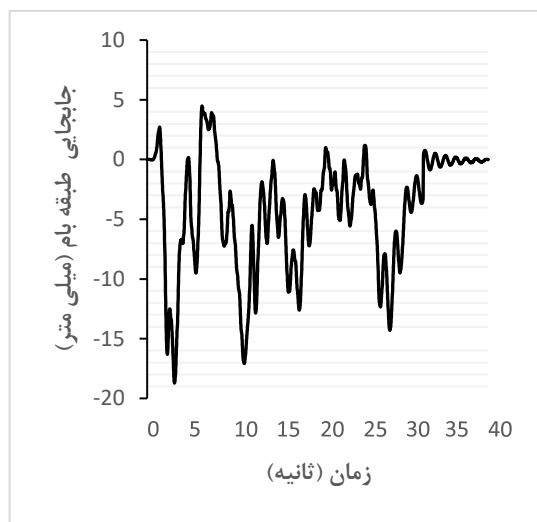
در شکل (۱۵) خروجی‌های مربوط به حالت ششم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S3 و اثر جداساز با مقدار سختی برابر k می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت بیشینه جابجایی لغزشی برابر $۴۵/۶$ میلیمتر، بیشینه جابجایی طبقه بام برابر $۲۰/۸۶$ میلیمتر و بیشینه برش پایه ایجاد شده برابر $۲۸/۱۱$ کیلونیوتن شده است.

۷-۱-۳- حالت ۷

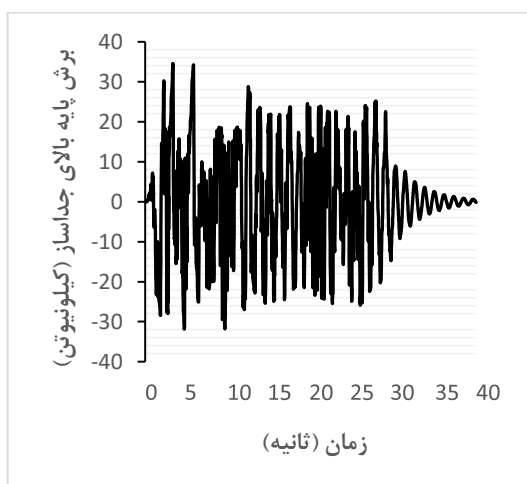
در شکل (۱۶) خروجی‌های مربوط به حالت هفتم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۸ طبقه، نوع خاک S2 با در نظر گرفتن جداگر و سختی میراگر K می باشد. همان طور که مشاهده می گردد، در این حالت بیشینه جابجایی لغزشی برابر ۲۹/۷۴ میلیمتر، بیشینه جابجایی طبقه بام برابر ۱۷/۸۱ میلیمتر و بیشینه برش پایه ایجاد شده برابر ۳۴/۵۹ کیلونیوتن شده است.



الف

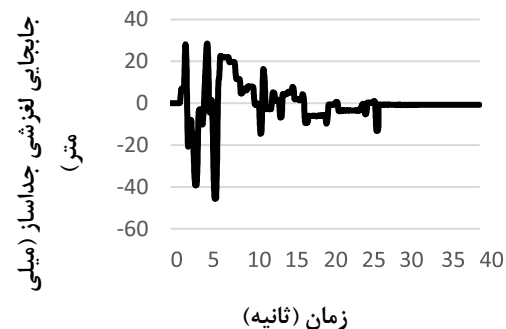


ب

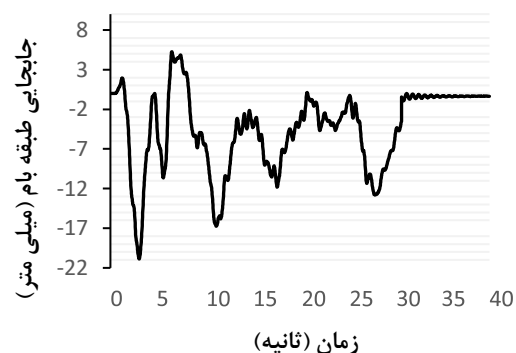


ج

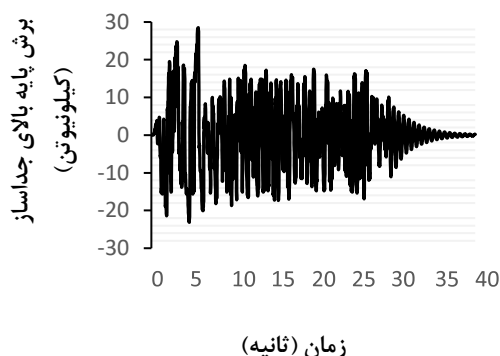
شکل ۱۶- خروجی‌های مربوط به حالت پانزدهم الف: جابجایی لغزشی ب: نمودار جابجایی طبقه بام ج: نمودار برش پایه - زمان



الف



ب

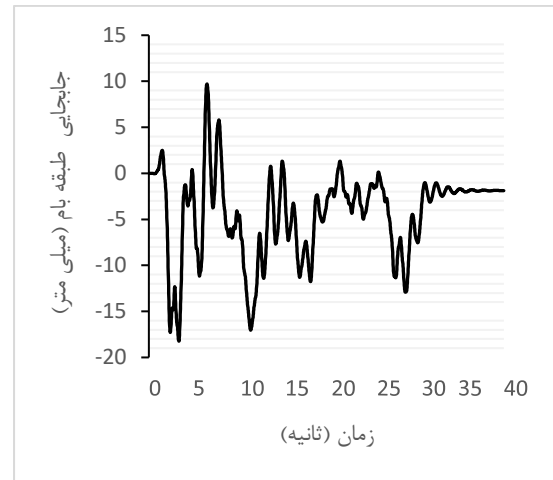


ج

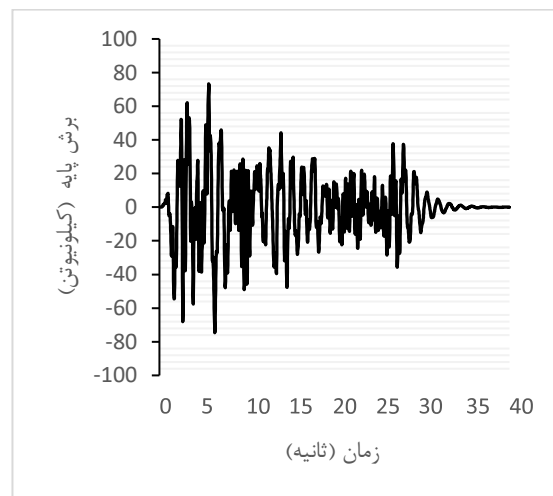
شکل ۱۵- خروجی‌های مربوط به حالت ششم الف: جابجایی لغزشی ب: نمودار جابجایی طبقه بام ج: نمودار برش پایه - زمان

۳-۱-۸- حالت ۸

در شکل (۱۷) خروجی‌های مربوط به حالت هشتم نشان داده شده است. در این حالت تعداد طبقات برابر ۵ طبقه، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، نوع خاک S2 و بدون حضور جداساز می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در این حالت بیشینه جابجایی طبقه بام برابر ۱۸/۲۴ میلی‌متر و بیشینه نیروی برشی ایجاد شده برابر ۷۴/۶۳ کیلونیوتن می‌باشد.



الف



ب

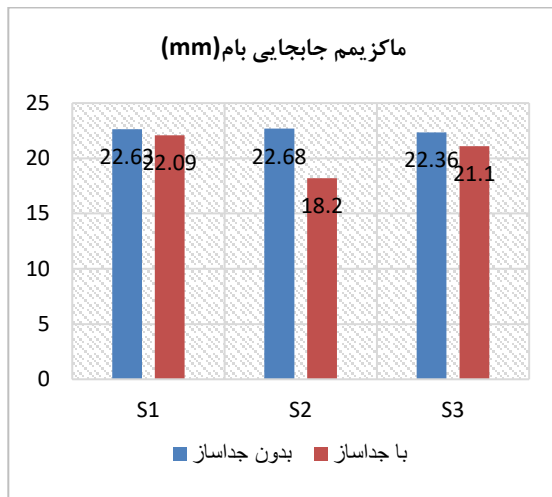
شکل ۱۷- خروجی‌های مربوط به حالت هشتم الف: نمودار جابجایی طبقه بام ب: نمودار برش پایه - زمان

۳-۲- تفسیر نتایج و بحث

پس از ارائه‌ی خروجی‌های حاصل از تحلیل مدل‌های مورد بررسی در این بخش به بررسی نتایج حاصل، پرداخته شده است. برای این منظور هر یک از خروجی‌های جابجایی لغزشی جداساز، جابجایی و نتایج تفسیر می‌گردند.

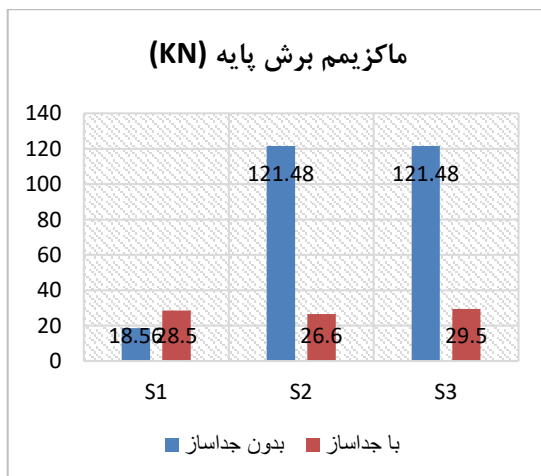
۳-۲-۱- اثر جداساز

در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از اثر جداساز در ساختمان ۵ طبقه در خاکهای مختلف S1، S2 و S3 پرداخته می‌شود. نتایج حاصل در قالب مقایسه ماکزیمم جابجایی طبقه بام، ماکزیمم برش پایه سازه با توجه به نتایج حاصل از بخش قبل به ترتیب در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌گردد.



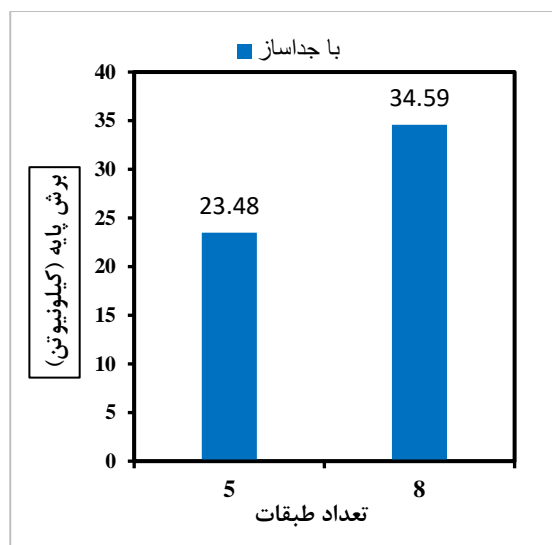
شکل ۱۸- مقایسه ماکزیمم جابجایی بام سازه ۵ طبقه

همانگونه که از شکل (۱۸) مشاهده می‌گردد در همه خاکها اضافه کردن جداساز به سبب کاهش میزان جابجایی بام گردیده است این کاهش در خاک S2 بیشترین مقدار خود را به میزان ۲۰ درصد تجربه کرده است. بنابراین با توجه به تأثیر نوع خاک بر جداسازها لازم است در تحلیل‌های اندرکنش خاک- سازه به مشخصات خاک منطقه بصورت دقیق در آنالیز وارد گردد.

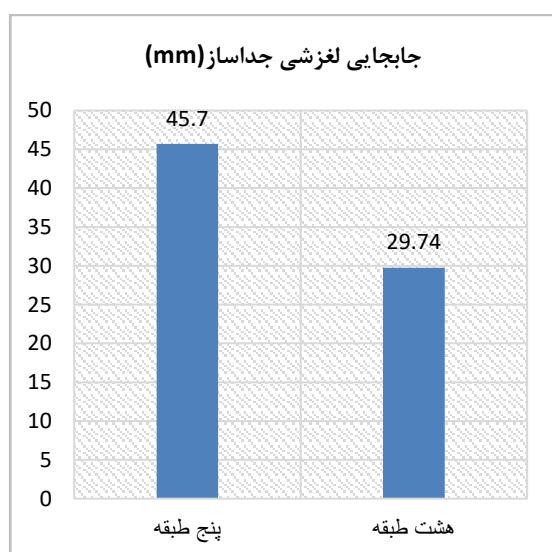


شکل ۱۹- مقایسه ماکزیمم برش پایه

می‌یابد. این موضوع در شکل (۲۲) که اثر ماکزیمم لغزش جداساز را نشان می‌دهد به خوبی نمایان است، که در سازه ۸ طبقه ماکزیمم جابجایی لغزشی جداساز نسبت به ساختمان ۵ طبقه کاهش یافته‌است که این مسأله با توجه به اینکه هر دو سازه تحت یک بار خارجی قرار می‌گیرند قابل توجیه است که سازه سنگین تر (۸ طبقه) ماکزیمم جابجایی کمتری را تا حدود ۳۷ درصد تجربه می‌کند. به علت وزن زیادتر سازه ۸ طبقه نسبت به سازه ۵ طبقه نیروی فشاری بالاتر سبب اصطکاک بسیار بیشتری شده‌است و این امر سبب شده‌است که نیروی برشی افزایش یابد.



شکل ۲۱- مقایسه بیشینه برش پایه سازه ۵ و ۸ طبقه با جداساز و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه

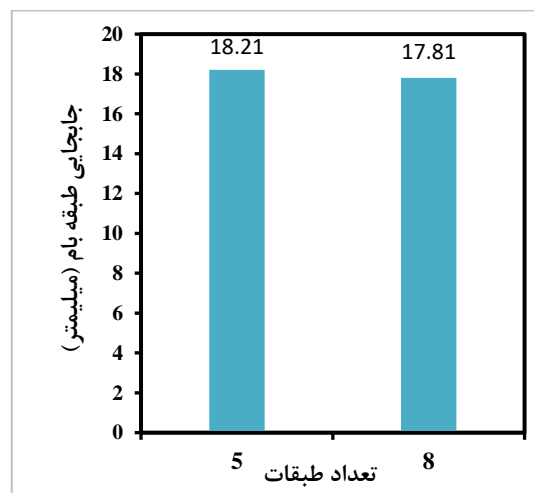


شکل ۲۲- اثر جابجایی لغزشی جداساز در ساختمان ۵ و ۸ طبقه

در شکل (۱۹) این نتایج در قالب ماکزیمم برش پایه نمایش داده شده‌است که اثرات جداساز در کاهش برش پایه در خاکهای S2 و S3، تفاوت معناتری دارد، به گونه‌ای که طراحی جداساز، برش پایه را تا حدود ۸۰ درصد کاهش داده‌است. البته در خاک S1 که خاک نرم‌تری محسوب می‌گردد مقداری افزایش برش پایه را داشته ایم که البته نیاز است مطالعات در خاک‌های نرم با در نظر گرفتن مدل رفتاری برای خاک در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

۳-۲-۲- بررسی اثر تعداد طبقات سازه

در این بخش به بررسی اثرگذاری تعداد طبقات سازه پرداخته شده‌است. برای این منظور دو ساختمان با ارتفاع ۵ و ۸ طبقه مستقر بر خاک S2 و سختی جداساز K که مورد تحلیل قرار گرفته‌اند، بررسی می‌گردد. در شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به ترتیب به مقایسه مقادیر حداکثر جابجایی بام و حداکثر نیروی برش پایه در سازه‌ها با هدف ارزیابی اثر افزایش تعداد طبقات سازه بر عملکرد جداساز لرزه‌ای پرداخته شده‌است.



شکل ۲۰- مقایسه بیشینه جابجایی بام سازه ۵ و ۸ طبقه با جداساز و با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد استفاده از جداساز باعث شده‌است که بیشینه جابجایی بام در ساختمان ۸ طبقه به میزان ۲ درصد نسبت به ساختمان ۵ طبقه، کاهش و بیشینه برش پایه در ساختمان ۸ طبقه به میزان ۳۰ درصد نسبت به ساختمان ۵ طبقه افزایش یابد. از این رو می‌توان به این نتیجه دست یافت که اثرگذاری عملکرد جداساز لرزه‌ای با افزایش تعداد طبقات تغییرپذیر است. به‌طوریکه با افزایش تعداد طبقات اثر مثبت جداساز لرزه‌ای کاهش

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی اثرات جداسازهای لرزه‌ای در سازه‌های مستقر بر انواع خاکها و اثر ارتفاع سازه بر پاسخ، مدلسازی صورت گرفته‌است. جهت اطمینان از نتایج حاصل، رفتار سازه و جداساز با مقایسه مورد صحت سنجی قرار گرفته‌است و پس از آن نتایج مورد نظر به شرح زیر حاصل گردید:

- ۱- استفاده از جداسازها باعث کاهش تا ۲۰ درصدی جابجایی بام سازه در برخی از خاکها می‌گردد.
- ۲- کاهش برش پایه با استفاده از جداسازها در برخی از خاکها تا ۸۰ درصد امکان پذیر است. البته این موضوع کلی نیست و بستگی به نحوه مدلسازی صحیح تر خاک (از جمله رفتار غیرخطی) دارد.
- ۳- با افزایش طبقات سازه‌ها اثر جداساز در ماکزیمم

جابجایی بام در سازه‌های مستقر بر خاک مورد نظر (S2) اندکی کاهش یافته‌است. البته عملکرد جداگر و سختی آن می‌تواند در این رفتار تأثیر گذار باشد که کاهش حدود ۳۷ درصدی جابجایی لغزشی در سازه‌های ۸ طبقه نسبت به ۵ طبقه در کسب این نتیجه بی تأثیر نمی‌باشد.

۴- با افزایش طبقات، اثر جداساز در ماکزیمم برش پایه افزایش یافته‌است به گونه‌ای که در ساختمان ۸ طبقه افزایش برش پایه تا حدود ۳۰ درصد نسبت به ساختمان ۵ طبقه مشاهده شده‌است.

در مجموع اثرات خاک و جداساز در سازه‌ها حائز اهمیت است و ضروری است تأثیر رفتار الاستو-پلاستیک خاک و تغییرات سختی جداساز در نتایج پاسخ سازه‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

- [۱] راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (نشریه ۵۲۳)، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، ۱۳۸۹.
- [۲] هاشم شریعتمدار و سید میثم کلانتری، " بررسی اثر جداگرهای لرزه‌ای بر جابجایی‌های طبقات و تشکیل مفاصل پلاستیک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۶، شماره ۱۵، زمستان ۱۳۸۷، صفحه ۴۶-۳۱.
- [۳] مسعود بزرگوار و عباس کرم‌الدین، " کاربرد میراگر پاندولی اصطکاکی در قاب مهاربندی و تأثیر آن بر رفتار و پاسخ سازه"، کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، ایران، ۱۷ تا ۱۸ اردیبهشت، دوره ۷، ۱۳۹۲.
- [4] J. S. Babu, J. Rex, V. P. Reddy, and C. V. Kumar, "Comparative study on non-linear time history analysis of a building with and without base isolation using etabs", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1091, No. 1, 2021, p. 012029, IOP Publishing.
- [۵] سیروان رسول‌پور و سید آرش موسوی قاسمی، "ارزیابی رفتار لرزه‌ای سیستم‌های جداگر پایه پاندولی اصطکاکی در سازه‌های بتن‌آرمه نامنظم"، کنفرانس مصالح و سازه‌های نوین در علم مهندسی عمران، شیراز، تهران، ۱۵ مرداد، دوره ۱، ۱۳۹۳.
- [۶] سیده مریم نوراشرف‌الدین و حمید رضا توکلی، " تأثیر موقعیت جداساز در ارتفاع سازه بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتنی"، کنفرانس بین‌المللی ژئوتکنیک و مهندسی لرزه‌ای شهری، تبریز، ایران، ۱۶ تا ۱۸ شهریور، دوره ۲، ۱۳۹۴.
- [۷] مجتبی حسینی و عبدالله قوامی، "اندرکنش خاک و سازه‌های بتنی با قاب خمشی ویژه و دیوار برشی در ساختگاه‌های تیپ IV و III"، کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، ایران، ۱۵ مهر، دوره ۴، ۱۳۹۱.
- [۸] غلامرضا قدرتی امیری، مجید برارنیا، محمد عابدپور و پژمان نمیرانیان، " اثر برخورد سازه‌های مجاور بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌های با جداگر لرزه‌ای در اثر زلزله"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۴، بهار ۱۳۹۰، صفحه ۶۵-۵۳.
- [۹] سید روح‌الله حسینی واعظ و حسین نادرپور، " بررسی نحوه آرایش جداگرهای لرزه‌ای در ساختمان‌های کوتاه مرتبه"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۱۵-۱۰۵.
- [10] S. Bandyopadhyay, Y.M. Parulekar, A. Sengupta, J. Chattopadhyay, "Structure soil structure interaction of conventional and base-isolated building subjected to real earthquake". Structures, Vol. 32, 2021, pp.474-493.

- [۱۱] محمد جواد بنیادی، صادق اعتدالی و علی قدس، "ارزیابی عملکرد جداسازهای پایه بر کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های بلند با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه"، کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، تهران، ایران، ۱۹ تا ۲۰ اسفند، دوره ۲، ۱۳۹۶.
- [۱۲] محمد ذاکری نژاد، "بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با در نظر گرفتن آثار اندرکنش خاک و سازه"، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، ایران، ۲۵ مرداد، دوره ۱، ۱۳۹۶.
- [13] C. C. Spyrakos, C. A. Maniatakis, and I. A. Koutromanos, "Soil-structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum", *Engineering Structures*, Vol. 31, 2008, pp.729-737.
- [14] F. Amini, and M. Shadlou, "Embedment effects of flexible foundations on control of structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*", Vol. 31, No.8, 2011, pp.1081-1093.
- [15] E. Alavi, And M. Alidoost, "Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Behavior of Base-Isolated Buildings", world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal, 24-28 September, 15th, 2012.
- [16] S. Mahmoud, P. Austrell, and R. Jankowski, "Simulation of the response of base-isolated buildings under earthquake excitations considering soil flexibility", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 11, 2012, pp.359-374.
- [17] T. Karabork, I. O. Deneme, and R.P. Bilgehan, "A comparison of the effect of SSI on base isolation systems and fixed-base structures for soft soil", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 7, No.1, 2014, pp.87-103.
- [18] J. Enrique Luco, "Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*", Vol. 66, 2014, pp.167-177.
- [19] Z. Haiyang, Y. Xu, Z. Chao, and J. Dandan, "Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 67, 2014, pp.208-2018.
- [20] K. Rajkumar, R. Ayothiraman, V. A. Matsagar, "Effects of Soil-Structure Interaction on Torsionally Coupled Base Isolated Machine Foundation under Earthquake Load", *Shock and Vibration*, 2021, pp.1-18.
- [21] S. Jabini Asli, H. Saffari, and M. Saadatinezhad, "Investigating the influence of soil conditions and surcharge mass on seismic responses of ground surface", *Journal of Seismology*, 2021, pp.1-17.
- [22] E. Tafakori, M. Banazadeh, A. Jalali, and M. Tehranizadeh, "Risk-based optimal retrofit of a tall steel building by using friction dampers", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 22, No.9, 2013, pp.700-7017.
- [23] ABAQUS theory manual. Pawtucket, R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.; Version 6.11. ,2016.
- [24] A. Krishnamoorthy, and S. Anita, "Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model", *Structures*, Vol. 5, 2016, pp.44-57.
- [25] A. K. Chopra, "Dynamic of structures theory and application to earthquake engineering " ,2th ed., Prentice-Hall, United States of America, 1993.
- [26] M. S. Asheghabadi, , and H. Matinmanesh, "Finite element seismic analysis of cylindrical tunnel in sandy soils with consideration of soil-tunnel interaction", *Procedia Engineering*, Vol.14, 2011,pp. 3162-3169.
- [27] <http://peer.berkeley.edu>