

بررسی اندرکنش خاک و سازه و تأثیر آن بر طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند: مروری

بر مطالعات اخیر.

احمد عظیمی نژاد^{۱*}، محسن ملکی نژاد شهر بابکی^۲

۱- کارشناس پروژه مدیریت پروژه ساختمان‌های اداری شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

aziminejad_ah@golgohar.com

۲- استادیار دکتری تخصصی مهندسی عمران - سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

malekinejad.mohsen@gmail.com

خلاصه

اندرکنش خاک و سازه (SSI) تأثیر بسزایی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، به‌ویژه در مناطقی با خاک‌های نرم یا محیط‌های شهری پرتراکم، دارد. این مقاله با مروری جامع بر مطالعات اخیر، اثرات مثبت و منفی SSI بر سازه‌ها را بررسی می‌کند. درحالی‌که SSI می‌تواند در شرایط خاص نیازهای لرزه‌ای را کاهش دهد، در بسیاری از موارد باعث افزایش تغییرمکان‌های جانبی، دررفت‌های بین‌طبقه‌ای و تنش‌های فونداسیون، به‌ویژه در خاک‌های نرم، می‌شود. برای درک بهتر این اثرات و ارائه راهبردهای کاهش آسیب، از تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته نظیر شبیه‌سازی‌های المان محدود، روش‌های احتمالاتی و آزمایش‌های تجربی در مقیاس بزرگ استفاده شده است. یافته‌های کلیدی بر اهمیت طراحی بهینه فونداسیون، چیدمان مؤثر سازه‌ای و به‌کارگیری دستگاه‌های اتلاف انرژی در بهبود عملکرد لرزه‌ای تأکید دارند. این مطالعه همچنین بر ضرورت ادغام ملاحظات SSI در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای و کاربردهای عملی مهندسی تأکید کرده و راهکارهایی در زمینه طراحی سیستم‌های فونداسیون ویژه، تکنیک‌های پیشرفته جداسازی لرزه‌ای و ضرایب اصلاح پاسخ مبتنی بر ریسک ارائه می‌دهد. با هدف پر کردن شکاف میان تحقیقات نظری و کاربردهای عملی، این پژوهش به ارتقای مقاومت و پایداری ساختمان‌های بلند در مناطق لرزه‌خیز اختصاص یافته است.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، سازه‌های بلند، میراگر ویسکوز، طراحی لرزه‌ای.

۱- مقدمه

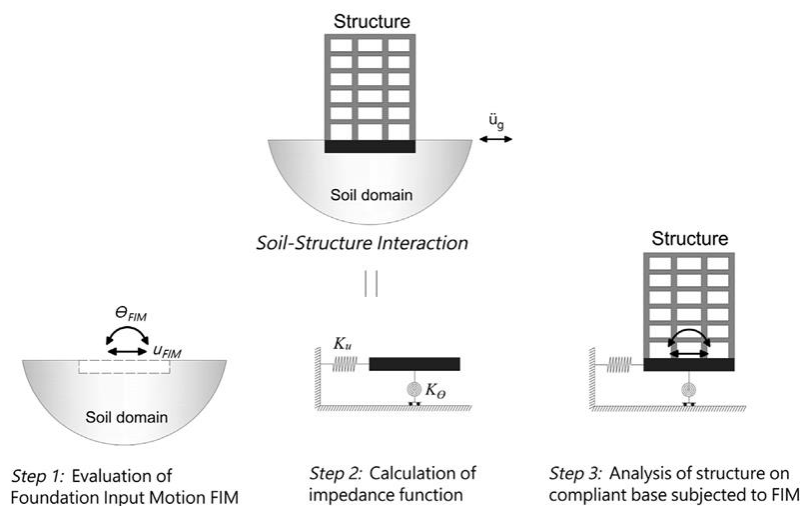
رشد فزاینده شهرنشینی و نیاز به بهینه‌سازی استفاده از زمین، ساخت سازه‌های بلندمرتبه را به یکی از اولویت‌های مهندسی عمران تبدیل کرده است. سازه‌های مهندسی عمران به صورت مستقیم با خاک در تماس هستند. زمانی که نیروی دینامیکی خارجی مانند زلزله یا ارتعاش بر این سازه‌ها اعمال می‌شود، پاسخ سازه و پاسخ زمین به یکدیگر تأثیر می‌گذارند. این تعامل بین خاک و سازه به عنوان تعامل دینامیکی خاک-سازه (SSI^1) شناخته می‌شود. پس از زلزله نیگاتا در سال ۱۹۶۴ در ژاپن، مشخص شد که آسیب‌های سازه‌ای تنها به رفتار سازه فوقانی وابسته نیست، بلکه به زیرلایه خاکی که سازه بر روی آن قرار گرفته نیز بستگی دارد [۱]. در نتیجه، پژوهشگران متعددی رفتار خاک تحت بارگذاری دینامیکی را از طریق تحقیقات تجربی، تحلیلی و عددی بررسی کرده‌اند.

در شرایطی که سازه تحت حرکت زلزله بر روی خاک نسبتاً نرم قرار دارد، خاک زیرین می‌تواند دو اثر مختلف بر سازه ایجاد کند [۲]:

الف- تعامل کینماتیک؛ این اثر به دلیل تفاوت در سختی بین فونداسیون و خاک زیرین ایجاد می‌شود. زمانی که حرکت زلزله در حالت میدان آزاد (FFM^1) منتشر می‌شود، امواج به دلیل وجود یک فونداسیون سخت تغییر شکل داده و پراکنده می‌شوند. حرکت حاصل در پایه فونداسیون به عنوان حرکت ورودی فونداسیون (FIM^2) شناخته می‌شود. اثرات تعامل کینماتیک بیشتر در فونداسیون‌های عمیق و مدفون برجسته‌تر هستند.

ب- تعامل اینرسی؛ این پدیده زمانی رخ می‌دهد که اینرسی ایجاد شده در سازه مرتعش منجر به افزایش نیروی برشی پایه و ممان واژگونی در سطح فونداسیون شود و تغییر شکل اضافی در خاک ایجاد کند. تغییر شکل در خاک زیرین انعطاف‌پذیری بیشتری به سیستم SSI ارائه می‌دهد و حرکت پایه را بیشتر تغییر می‌دهد.

در سال‌های اخیر، مطالعات مربوط به اندرکنش خاک و سازه (SSI) توجه ویژه‌ای در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند به خود جلب کرده است. حل مسائل تعامل خاک-سازه (SSI) با استفاده از روش زیرسازه به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود که در (شکل ۱) نشان داده شده است:



شکل ۱: رویکرد زیرسازه‌ای در تحلیل اندرکنش خاک و سازه [۳].

۱- ارزیابی حرکت ورودی فونداسیون (FIM)؛ این مرحله شامل ارزیابی توابع انتقال برای تبدیل حرکت میدان آزاد (FFM) به FIM است که بر اساس سختی و هندسه فونداسیون و خاک انجام می‌شود. در این مرحله، سازه و فونداسیون به صورت بدون جرم در نظر گرفته می‌شوند. نیاز لرزه‌ای اعمال شده به فونداسیون توسط مؤلفه‌های چرخشی (θ_{FIM}) و انتقالی (U_{FIM}) نمایش داده می‌شود. نسبت FIM به FFM به عنوان یک تابع انتقال نام‌گذاری شده است که تنها اثرات تعامل سینماتیک را نشان می‌دهد و تعامل اینرسی را نادیده می‌گیرد.

1 Free Field Motion

2 Foundation Input Motion

۲- ارزیابی توابع امپدانس فونداسیون؛ توابع امپدانس، ویژگی‌های سختی و میرایی مربوط به تعامل خاک-فونداسیون را که وابسته به فرکانس بوده را تعریف می‌کنند. این توابع معمولاً با مدل‌های ساده تابع یا مجموعه‌ای از فنرها و دمپرها با مولفه‌های سختی K_{II} (افقی) و K_{θ} (دورانی) نمایش داده می‌شوند.

۳- محاسبه پاسخ لرزه‌ای سازه؛ در این مرحله، سازه با استفاده از فنرها و دمپرها به عنوان پایه تکیه‌گاهی مدل می‌شود و حرکت ورودی فونداسیون (FIM) به عنوان حرکت ورودی اعمال می‌شود. سپس پاسخ لرزه‌ای سازه با استفاده از تحلیل طیف پاسخ یا تحلیل تاریخچه زمانی محاسبه می‌شود.

هدف این مقاله ارائه یک مرور سیستماتیک و جامع از مطالعات اخیر در زمینه اندرکنش خاک و سازه (SSI) و تحلیل تأثیرات آن بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند است. این پژوهش با تمرکز بر شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی، بررسی روش‌های عددی و تحلیلی، و ارزیابی اثرات دینامیکی بر رفتار سازه‌ها، به دنبال ارائه راهکارهایی عملی برای بهبود طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در محیط‌های پیچیده است.

این مطالعه با مرور مقالات منتشر شده طی دهه اخیر، به‌ویژه تحقیقات منتشر شده در سال ۲۰۲۴، تلاش کرده است تا روندهای کلیدی و پیشرفت‌های علمی در این حوزه را شناسایی کند. از جمله، تحلیل اندرکنش کینماتیک و اینرسی، ارزیابی نقش شرایط خاک زیرین، و کاربرد فناوری‌های نوین نظیر مدل‌سازی پیشرفته و تکنیک‌های کاهش آسیب لرزه‌ای، از موضوعات مورد بررسی بوده‌اند. در این راستا، اهداف جزئی زیر نیز دنبال شده‌اند:

۱. تحلیل تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر تغییر مکان‌ها، دریافت بین‌طبقه‌ای، و نیروی برشی پایه.

۲. ارزیابی قابلیت‌های روش‌های موجود در تحلیل SSI و شناسایی محدودیت‌های آن‌ها.

۳. ارائه پیشنهادهایی برای توسعه آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه.

نتایج این مطالعه می‌تواند به ایجاد درکی عمیق‌تر از رفتار سیستم خاک-سازه کمک کرده و مبنای تحقیقات آینده در زمینه مدل‌سازی دینامیکی و طراحی بهینه سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله باشد.

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه‌ای بر اندرکنش خاک-سازه (SSI):

تعامل خاک-سازه (SSI) به یکی از موضوعات برجسته تحقیقاتی در مهندسی سازه و زلزله تبدیل شده است. مفهوم SSI به سال ۱۹۳۶ برمی‌گردد که در ابتدا تمرکز اصلی بر اندرکنش بین خاک و سازه‌های زیرزمینی بود [۴]. در دهه‌های بعدی، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شد که دامنه آن را به سازه‌های زیرزمینی و سطحی گسترش داد. در سال‌های اخیر، با افزایش پیچیدگی سازه‌ها و شرایط خاک، بررسی دقیق‌تر اندرکنش خاک-سازه به یکی از اولویت‌های اصلی مهندسی سازه تبدیل شده است.

۲-۲- تاریخچه و مفاهیم اولیه:

بیلک (۱۹۷۴) در مطالعه خود نشان داد که برای سازه‌هایی که بر روی سنگ یا خاک‌های سخت قرار دارند، می‌توان پی آن‌ها را به‌عنوان ثابت در نظر گرفت، درحالی‌که برای خاک‌های متوسط تا نرم، اثرات اندرکنش خاک و سازه (SSI) قابل‌توجه بوده و نباید نادیده گرفته شود [۵]. سپس جانسون و اسفورا (۱۹۹۳) بیان کردند که SSI به ارتباط میان خاک زیرین و سازه‌ی مستقر بر روی آن اشاره دارد و این اندرکنش ناشی از انتقال ارتعاشات زمین به سازه می‌باشد [۶].

با توسعه ابزارهای تحلیلی و عددی پیشرفته، امکان بررسی دقیق‌تر این اندرکنش‌ها و شناسایی تأثیرات آن بر طراحی سازه‌ها فراهم شد.

۲-۳- تأثیر SSI بر رفتار دینامیکی و استاتیکی سازه‌ها:

اهمیت تعامل خاک-سازه (SSI) برای مسائل استاتیکی و دینامیکی به خوبی مشخص شده است و ادبیات این حوزه حداقل ۵۰ سال از پیشرفت‌های محاسباتی و تحلیلی را پوشش می‌دهد [۹-۷]. نتیجه‌گیری مشترک همه مطالعات نشان می‌دهد که، پیامدهای SSI بر سازه‌های ساختمانی همچنان مورد بحث است.

از یک سو، تعامل خاک-سازه به طور سنتی برای پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مفید در نظر گرفته شده است، همان‌طور که در برخی دستورالعمل‌های طراحی [۱۲-۱۰] به آن اشاره شده است. در میان این دستورالعمل‌ها راهنمایی‌هایی برای محاسبه دوره تناوب طبیعی تعدیل‌شده و نیروهای برشی پایه سازه با در نظر گرفتن اثرات SSI ارائه می‌دهند، که در آن تقاضای لرزه‌ای سازه با در نظر گرفتن SSI همواره کمتر از سیستم با پایه ثابت محاسبه می‌شود.

از سوی دیگر، تحقیقات و مطالعات معاصر در مورد پیامدهای SSI داستان متفاوتی را به‌ویژه با در نظر گرفتن غیرخطی بودن خاک بیان می‌کنند. تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که اثرات SSI می‌توانند در برخی موارد زیان‌بار باشند، به طوری که نادیده گرفتن این اثرات منجر به طراحی نامناسب می‌شود.

کراس و دژاکیچ (۲۰۱۳) بیان کردند که فرض تحلیل پایه ثابت برای ساختمان‌ها تنها در شرایطی معتبر است که سختی خاک فونداسیون نسبت به سازه فوقانی به طور قابل توجهی بیشتر باشد [۱۳]. بر اساس نتایج تحلیل، آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که فرض متداول مبنی بر افزایش دوره تناوب طبیعی و در نتیجه کاهش نیروهای داخلی به دلیل SSI، در مورد ساختمان‌های کم‌ارتفاع که بر خاک نرم قرار دارند، صحیح نیست.

شواهدی از خسارات زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که SSI به طور نامطلوبی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را تحت تأثیر قرار داده که باعث آسیب‌های سازه‌ای به ساختمان‌ها شده‌اند. به طور مثال زلزله مکزیکوسیتی در سال ۱۹۸۵ با بزرگای ۸.۱ در فاصله حدود ۳۸۰ کیلومتری از مرکز زمین‌لرزه رخ داد. با این حال، همگرایی در عوامل پاسخ سایت باعث آسیب‌های شدیدی به ساختمان‌های واقع در منطقه دریاچه شهر شد [۱۴].

این مطالعات نشان می‌دهند که در نظر گرفتن شرایط خاک و تحلیل دقیق SSI در طراحی ساختمان‌ها به‌ویژه در شرایط خاک‌های نرم، حیاتی است.

۲-۴- تأثیر خاک نرم بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها:

اهمیت SSI برای بارهای استاتیکی و همچنین دینامیکی یکی از موضوعات مورد توجه مهندسان سازه بوده است. این اثر، میرایی سیستم سازه‌ای را افزایش داده و دوره تناوب سازه را طولانی‌تر می‌کند [۱۵]. تأثیر SSI بر عملکرد کلی یک ساختمان، به‌ویژه در خاک‌های نرم، موضوعی بحث‌برانگیز در میان پژوهشگران است [۱۶].

کریمیان و ملکی‌نژاد (۱۴۰۲) در پژوهشی پیرامون اندرکنش خاک و سازه و تأثیر آن بر عملکرد میراگرهای ویسکوز نشان دادند که برخلاف باورهای رایج، این اندرکنش در خاک‌های نرم می‌تواند به‌طور چشمگیری کارایی میراگرها را کاهش داده و نیاز به تعداد بیشتری از آن‌ها را ضروری سازد. بر این اساس، در طراحی سازه‌های بلند، توجه ویژه به نوع خاک و شرایط تعامل میان خاک و سازه امری حیاتی است تا بتوان بهینه‌ترین عملکرد را از سیستم‌های میراگر به دست آورد [۱۷].

۲-۵-SSI و خطر کوبش سازه‌ها:

در مناطق زلزله‌خیز، درک ارتباط بین کوبش^۱ و تعامل خاک-سازه برای تضمین یکپارچگی سازه‌ای و ایمنی این ساختمان‌ها ضروری است [۱۸]. SSI می‌تواند خطر کوبش را به روش‌های مختلفی تحت تأثیر قرار دهد تأثیر SSI بر خطر کوبش در ساختمان‌های بلندمرتبه پیچیده بوده و به عواملی مانند خصوصیات خاک، طراحی و ویژگی‌های زلزله وابسته است. با این حال، شواهد نشان می‌دهد که SSI نقش مهمی در خطر کوبش ایفا می‌کند و نیازمند توجه دقیق در طراحی ساختمان‌های بلندمرتبه در مناطق زلزله‌خیز است [۱۹].

۲-۶-مطالعات موردی آزمایشگاهی در تحلیل SSI

در سال ۲۰۱۵، ری‌چودوری و ری-چادهوری نیازهای لرزه‌ای یک ساختمان چهارطبقه قاب خمشی فولادی را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه تحلیل کردند. آن‌ها تأکید داشتند که نادیده گرفتن این اثرات می‌تواند تحلیل‌های سازه‌ای را به طور قابل توجهی بی دقت کند. این نتایج بر لزوم بررسی و لحاظ اثرات اندرکنش در طراحی‌های لرزه‌ای تأکید دارد [۲۰]. باپیر و همکاران (۲۰۲۳)، مروری بر پیامدهای SSI دینامیکی بر سازه‌های ساختمانی بلندمرتبه ارائه کردند و ادبیات موجود در این زمینه را بررسی کردند [۲۱]. ساختمان‌های بلندمرتبه (HRBs^۲) در برابر زلزله آسیب‌پذیری بالاتری به دلیل افزایش شهرنشینی و فعالیت لرزه‌ای دارند. مطالعه انجام‌شده توسط کانتونی و فارقالی (۲۰۲۳) روش‌هایی را برای افزایش سختی ساختمان‌های بلندمرتبه از جمله دیوارهای برشی، مهاربندها و دمپرهای جرم تنظیم‌شده، با در نظر گرفتن تعامل خاک-سازه بررسی کرده است. نتایج نشان داد که تأثیرات مثبت بر مقاومت لرزه‌ای از طریق نیروهای پایه، جابجایی و دوره تناوب ساختمان مشهود است [۲۲].

آزمایش‌ها همواره از مهم‌ترین ابزارها برای کشف و توسعه دانش بوده‌اند و با بهره‌گیری از آن‌ها می‌توان به درک عمیقی از قوانین و رفتارهای طبیعی دست یافت. اولین مطالعات مرتبط با بررسی اندرکنش خاک-سازه به سال ۱۹۶۹ بازمی‌گردد، که توسط مک کالدن انجام شد [۲۳]. همچنین کلوتیو و همکاران با هدف ارتقای روش‌های تحلیل اندرکنش سازه-خاک-سازه و خاک-سازه، از ترکیب روش اجزای محدود و اجزای مرزی استفاده کردند و آزمایش‌های متعددی بر روی نمونه‌های واقعی و آزمایشگاهی انجام دادند تا دقت این روش‌ها را افزایش دهند [۲۴].

در سال ۲۰۰۹، گاجان و همکارانش عملکرد مدل فونداسیون مبتنی بر فنرهای وینکلر غیرخطی را با استفاده از نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدل BNWF^۳ قابلیت شبیه‌سازی انواع واکنش‌های واقعی در آزمایش سانتریفیوژ را داراست و از دقت قابل قبولی برخوردار است [۲۵].

در همان سال، ری‌چودوری و هاجینسون نیز به تحلیل عملکرد مدل فونداسیون سطحی وینکلر غیرخطی بر اساس نتایج آزمایش‌های مشابه پرداختند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که مدل مذکور قادر به پیش‌بینی پاسخ‌های مختلف فونداسیون از جمله برش، ممان، لغزش، نشست و دوران بوده و همچنین نیازهای نیرو و تغییر شکل به میزان قابل توجهی با لحاظ رفتار غیرخطی کاهش می‌یابد. به طور مثال، حداکثر برش طبقات تا ۳۰ درصد کاهش یافت [۲۶].

این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی می‌تواند به درک بهتر تأثیرات SSI کمک کند.

1 pounding

2 High-Rise Buildings

3 Beam on Nonlinear Winkler Foundation

۲-۷- روش‌های عددی در تحلیل SSI

روش‌های عددی مانند اجزای محدود (FEM) و اجزای مرزی (BEM) از کارآمدترین ابزارها برای تحلیل دقیق اندرکنش خاک-سازه (SSI) محسوب می‌شوند. این روش‌ها با قابلیت شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته خاک و مدل‌سازی دقیق مرزهای مشترک میان سازه، خاک و سنگ‌بستر، امکان بررسی جامع و واقع‌گرایانه رفتار دینامیکی سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌کنند. ترکیب این روش‌های عددی پیشرفته، به‌ویژه در شرایطی که اندرکنش‌های چندگانه میان خاک و سازه وجود دارد، به دستیابی به مدل‌سازی دقیق‌تر و واقعی‌تر از رفتار خاک و پاسخ دینامیکی سازه‌ها کمک کرده است. معرفی و توسعه این تکنیک‌ها، که تقریباً هم‌زمان با پیدایش مفهوم اندرکنش خاک و سازه در تحقیقات لرزه‌ای شکل گرفته‌اند، نقشی اساسی در بهبود درک ما از رفتار سیستم‌های سازه‌ای در شرایط دینامیکی داشته‌اند.

در سال ۱۹۶۹، بررسی خاک برای استفاده از روش اجزای محدود توسط لیسمر و کولمیر آغاز گردید [۲۷]. در این پژوهش، خاک که ذاتاً یک محیط نامحدود به شمار می‌رود، به صورت شبکه‌بندی‌شده و به شکل یک محیط محدود مدل‌سازی شد. ونگ و لوکو در ادامه، روشی برای تحلیل گروهی از پی‌های سطحی با شکل‌های دلخواه که بر روی خاک ویسکوالاستیک چندلایه قرار دارند، ارائه نمودند که بر پایه روش اجزای مرزی بنا شده بود [۲۸]. در سال بعد، لین و همکاران با تمرکز بر بررسی اندرکنش سازه-خاک، اثرات فاصله سازه‌ها، جهت‌گیری، مدفون‌شدگی و جرم سازه را با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند [۲۹].

روش‌های تحلیل مستقیم و زیربخشی نتیجه دو مسیر متفاوتی هستند که توسعه SSI طی ۲۵ سال گذشته طی کرده است.

از نظر سیستم‌های پیشرفته، این دو روش تقریباً مشابه هستند و تنها تفاوت آن‌ها در محدودیت‌های مرزی دینامیکی تعریف‌شده در مرز منطقه خاک مورد بررسی است. بنابراین، می‌توان یک فرمول واحد توسعه داد که برای هر دو روش به‌طور یکسان قابل اعمال باشد. در زمینه روش زیربخشی، مشخص شده که روش المان مرزی برای مدیریت شرایط نامنظم هندسی در سطح تماس خاک و سازه به‌ویژه کارآمد است [۳۰].

یکی از موضوعات پیچیده و بحث‌برانگیز در زمینه طراحی لرزه‌ای و بازتأییدی سازه‌ها، انتخاب دقیق‌ترین و واقعی‌ترین روش مدل‌سازی و محاسباتی برای در نظر گرفتن اثرات دینامیکی SSI است.

روش‌های عددی (مانند FDM و FEM) می‌توانند تأثیرات میرایی تابشی، میرایی مواد، ناهمسانگردی تنش، شرایط مواد ناهمگن، رفتار غیرخطی مواد و تغییرات هندسی خاک پشتیبان را در تحلیل دینامیکی SSI ادغام کنند، در حالی که سایر روش‌های مدل‌سازی SSI به چنین قابلیت‌هایی نمی‌پردازند [۳۱]. پیشرفت این روش‌ها به شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار SSI کمک کرده و راه را برای تحلیل‌های پیشرفته‌تر هموار ساخته است.

بر اساس مرور مقالات، نتیجه‌گیری می‌شود که اهمیت تعامل خاک-سازه (SSI) توجه بسیاری از پژوهشگران را به بررسی پیامدهای SSI بر سازه‌های مختلف و توسعه تکنیک‌های مدل‌سازی در سطوح مختلف دقت جلب کرده است. با این حال، در نظر گرفتن اثرات SSI در طراحی‌های عملی هنوز توجه کافی از سوی مهندسان سازه را جلب نکرده است. این موضوع احتمالاً به دلیل کمبود دستورالعمل‌های جهانی و باور رایج مبنی بر اینکه اثرات SSI بر سازه‌ها همواره مفید هستند، می‌باشد. با این حال، مطالعات معاصر و شواهد حاصل از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهند که نادیده گرفتن اثرات SSI می‌تواند منجر به طراحی غیرایمن شود. این مقاله با هدف بررسی جامع مطالعات اخیر و ارائه پیشنهادهایی برای بهبود طراحی‌های لرزه‌ای در حضور SSI، تلاش می‌کند تا به رفع بخشی از این شکاف‌ها کمک کند. همچنین، ضرورت توسعه دستورالعمل‌های بین‌المللی و مدل‌های پیشرفته‌تر که بتوانند شرایط متنوع خاک و سازه را پوشش دهند، همچنان احساس می‌شود.

۳- روش تحقیق

این پژوهش با رویکرد مرور سیستماتیک مقالات علمی (Systematic Literature Review) انجام شده است تا پیشرفت‌ها، چالش‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی مرتبط با اندرکنش خاک و سازه (SSI) در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند شناسایی و تحلیل شود. هدف اصلی این مطالعه، ارائه دیدگاهی جامع در مورد تحقیقات گذشته و پیشنهاد راهکارهایی برای بهبود طراحی سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات SSI است.

۳-۱- معیار انتخاب مقالات:

برای اطمینان از کیفیت و جامعیت مقالات مورد بررسی، معیارهای مشخصی در فرآیند انتخاب آن‌ها اعمال شد. ابتدا، تنها مقالات منتشرشده در بازه زمانی ۱۰ سال گذشته (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴) بررسی شدند، با تمرکز ویژه بر تحقیقات جدیدتر، به‌ویژه مقالات سال ۲۰۲۴. همچنین، مقالات انتخاب‌شده از مجلات علمی معتبر با شاخص تأثیر بالا و نمایه‌شده در پایگاه‌هایی مانند گوگل اسکولار، الزویر، و اشپرینگر بودند. فرآیند جستجو بر اساس ترکیب کلیدواژه‌هایی از جمله اندرکنش خاک و سازه (SSI)، تحلیل لرزه‌ای، ساختمان‌های بلند و مدل‌سازی دینامیکی انجام شد. در نهایت، مقالاتی که بر مطالعات عددی (مانند اجزای محدود و اجزای مرزی)، آزمایشگاهی (مانند آزمایش‌های سانتریفیوژ) و مرورهای نظری و تحلیلی تمرکز داشتند، انتخاب شدند.

۳-۲- روش جستجو و انتخاب مقالات:

فرآیند جستجو و انتخاب مقالات در سه مرحله انجام شد. ابتدا با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های مرتبط، جستجوی اولیه در پایگاه‌های داده معتبر صورت گرفت تا مقالات مرتبط شناسایی شوند. سپس عنوان و چکیده مقالات بررسی شد و مقالات نامرتب حذف شدند، درحالی‌که تنها مقالاتی که مستقیماً به موضوع تحقیق ارتباط داشتند، انتخاب شدند. در نهایت، مقالات منتخب به‌طور کامل مطالعه و تحلیل شدند تا اطلاعات لازم برای پاسخ به اهداف پژوهش و دستیابی به نتایج جامع فراهم شود.

۳-۳- چارچوب تحلیل و مقایسه مقالات:

برای تحلیل و مقایسه یافته‌های مقالات، چارچوبی مشخص و سازمان‌یافته مورد استفاده قرار گرفت. این چارچوب شامل چهار معیار اصلی بود: نخست، اهداف تحقیق برای شناسایی تمرکز اصلی هر مقاله، مانند تأثیرات کینماتیک و اینرسی در اندرکنش خاک و سازه (SSI) مورد بررسی قرار گرفت. سپس، روش‌شناسی مقالات شامل رویکردهای عددی، آزمایشگاهی یا تحلیلی تحلیل شد تا روش‌های به‌کار رفته در هر پژوهش مشخص شود. در ادامه، نتایج کلیدی هر مقاله بررسی و تأثیر آن‌ها بر طراحی لرزه‌ای سازه‌های بلند ارزیابی گردید. در نهایت، شکاف‌های تحقیقاتی موجود شناسایی شد تا موضوعاتی که هنوز نیازمند تحقیقات عمیق‌تر هستند، مشخص شوند.

۳-۴- ارزیابی مقالات:

مرور سیستماتیک مقالات علمی امکان تحلیل دقیق پیشرفت‌های تحقیقاتی در حوزه اندرکنش خاک و سازه (SSI) را فراهم می‌کند. این رویکرد با تجمیع و بررسی مطالعات گذشته، به شناسایی روندهای کلیدی، شکاف‌های تحقیقاتی و نقاط قوت و ضعف رویکردهای مختلف کمک می‌کند و تصویری جامع از وضعیت موجود ارائه می‌دهد. برای تسهیل تحلیل و مقایسه یافته‌های مقالات، از سه جدول مجزا استفاده شده است. هر جدول شامل اطلاعات مربوط به پنج مقاله منتخب است که حوزه تحقیق، روش‌شناسی، یافته‌های کلیدی و محدودیت‌های هر مقاله را به‌طور دقیق ارائه می‌دهد.

۴- بحث و تحلیل مقالات منتخب:

جدول شماره ۱ به بررسی پنج مقاله منتخب اول اختصاص دارد که تأثیر اندرکنش خاک و سازه (SSI) را بر آسیب پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های متوسط و بلند تحلیل کرده‌اند. این مقالات از روش‌های گوناگونی مانند مدل‌سازی عددی، روش BNWM، و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) برای ارزیابی تأثیر SSI بر پارامترهایی نظیر دوره تناوب طبیعی، جابه‌جایی بین‌طبقات، و ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها استفاده کرده‌اند. اطلاعات موجود در این جدول شامل حوزه تحقیق، روش‌شناسی، یافته‌های کلیدی، و محدودیت‌های هر مقاله است.

جدول ۱: بررسی مقالات مرتبط با آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های متوسط و بلند در شرایط SSI.

ردیف	مرجع مقاله	حوزه تحقیق	روش شناسی	یافته های کلیدی	محدودیت ها و تحقیقات آتی
۱	[۳۲]	آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح متوسط در لیسبون با در نظر گرفتن SSI.	روش BNWM و مدل‌سازی سه‌بعدی خاک. بررسی خاک رسی غیر زهکشی.	SSI باعث افزایش دوره تناوب و آسیب لرزه‌ای می‌شود و ظرفیت سازه را تا ۱۵٪ کاهش می‌دهد؛ مدل‌سازی صحیح فونداسیون حیاتی است.	محدود به ساختمان‌های متوسط روی خاک رسی؛ نیاز به بررسی انواع مختلف خاک و تحلیل‌های دینامیکی.
۲	[۳۳]	آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در شهر پتتا با در نظر گرفتن و نگرفتن تأثیرات SSI.	تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، روش گپ/لینک برای SSI، مدل‌سازی بر اساس بررسی میدانی.	SSI تأثیر قابل توجهی بر دوره تناوب، جابه‌جایی بین طبقات و ریسک لرزه‌ای دارد؛ طبقه نرم خطر را تقویت می‌کند.	متمرکز بر ساختمان‌های ۹ و ۱۵ طبقه؛ نیاز به گسترش به ساختمان‌های نامتقارن و دیگر سازه‌ها.
۳	[۳۴]	مروری جامع بر SSI در سازه‌های فضایی بزرگ دهانه.	مرور ادبیات؛ مطالعات عددی و تجربی در SSI برای سازه‌های فضایی بزرگ دهانه.	تأثیرات SSI بسته به نوع سازه و شرایط سایت متفاوت است؛ مدل‌سازی غیرخطی خاک برای دهانه‌های بزرگ ضروری است.	نیاز به آزمایش‌های بزرگ مقیاس و مدل‌سازی سه‌بعدی؛ مطالعات جامع بر روی تعامل سیال-خاک-سازه ناکافی است.
۴	[۳۵]	مدل‌سازی لایه نازک در سیستم‌های SSI.	مدل‌سازی المان محدود (FEM) با لایه نازک؛ بررسی تست برش مستقیم بزرگ.	لایه نازک دقت مدل FEM را بهبود می‌بخشد؛ ضخامت لایه به تنش، زبری و نوع خاک بستگی دارد.	عمدتاً برای لایه نازک استفاده می‌شود؛ نیاز به اعتبارسنجی گسترده‌تر برای انواع خاک و سازه‌ها.
۵	[۳۶]	تأثیر SSI بر پایداری و پایداری سازه‌های بتن مسلح.	تحلیل دینامیکی سیستم‌های دیوار-قاب بتن مسلح با در نظر گرفتن SSI و SSFI.	SSI خطر لرزه‌ای و پاسخ دینامیکی را تغییر می‌دهد؛ پایداری و تاب‌آوری در طراحی عملکرد-محور کلیدی هستند.	تأکید بر ادغام SSI با پایداری و تاب‌آوری در طراحی؛ SSFI به اندازه کافی بررسی نشده است.

یافته‌های کلیدی جدول فوق نشان می‌دهد که SSI می‌تواند رفتار سازه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد، به‌ویژه در شرایط خاک نرم یا برای سازه‌های بلند و متوسط. همچنین، این مقالات شکاف‌های تحقیقاتی مهمی از جمله نیاز به تحلیل تأثیر SSI بر انواع مختلف خاک، بررسی سازه‌های نامتقارن، و بهبود مدل‌سازی تعامل خاک و سازه را برجسته کرده‌اند.

جدول شماره ۲ به بررسی پنج مقاله منتخب دوم اختصاص دارد که بر مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی در زمینه اندرکنش خاک و سازه (SSI) تمرکز دارند. این مقالات با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند شبیه‌سازی عددی (SASSI و LS-DYNA)، تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی، و مرور تکنیک‌های مدل‌سازی SSI، تلاش کرده‌اند تا تأثیر SSI بر پاسخ سازه‌ها را بررسی کنند.

جدول ۲: مقالات منتخب در مدل‌سازی و تحلیل آزمایشگاهی اندرکنش خاک و سازه.

ردیف	مرجع مقاله	حوزه تحقیق	روش شناسی	یافته‌های کلیدی	محدودیت‌ها و تحقیقات آتی
۶	[۳۷]	تأثیرات تعامل سازه-خاک-سازه (SSSI) در ساختمان‌های کم‌ارتفاع تا متوسط	شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از SASSI و LS-DYNA؛ بررسی اثرات غیرخطی هندسی	SSSI تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ‌های کلی ندارد اما بر پاسخ فونداسیون، به‌ویژه در حضور زیرزمین‌های عمیق، تأثیر می‌گذارد.	تمرکز بر ساختمان‌های کم‌ارتفاع تا متوسط؛ نیاز به بررسی سازه‌های بزرگ مجاور زیرساخت‌های زیرزمینی.
۷	[۳۸]	خطر برخورد و SSI در ساختمان‌های بلند مجاور بتن مسلح	۷۲ مدل عددی با تحلیل دینامیکی؛ تحلیل منحنی شکنندگی برای ساختمان‌های مجاور	دیوارهای برشی مقاومت لرزه‌ای را تا ۵۶٪ افزایش می‌دهند؛ خطر برخورد با خاک نرم‌تر و فاصله ناکافی افزایش می‌یابد.	محدود به دو نوع سازه و مدل‌های خطی؛ پیشنهاد تحلیل غیرخطی و مطالعات احتمالاتی.
۸	[۳۹]	SSI و تعامل سازه-حفاری در ساختمان‌های بلند	FLAC2D برای تعامل ساختمان-حفاری؛ تحلیل‌های استاتیکی و لرزه‌ای	SSI تأثیر قابل‌توجهی بر تغییر شکل شمع و نشست دارد؛ حفاری مجاور تأثیرات لرزه‌ای را تشدید می‌کند.	تمرکز بر سناریوهای خاص ساختمان-حفاری؛ نیاز به مطالعات پارامتری گسترده‌تر برای سازه‌ها و خاک‌های مختلف.
۹	[۴۰]	تأثیرات SSI بر شکنندگی لرزه‌ای و خطر سازه‌های نیروگاه	ارزیابی احتمالی خطر لرزه‌ای (SPRA)؛ تحلیل منحنی شکنندگی SSI	SSI تأثیر قابل‌توجهی بر منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای دارد؛ نادیده گرفتن SSI عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی در پاسخ‌های سازه‌ای ایجاد می‌کند.	تمرکز بر یک نوع سازه؛ نیاز به تحلیل عدم قطعیت در مطالعات شکنندگی SSI.
۱۰	[۴۱]	مرور جامع تکنیک‌های مدل‌سازی SSI و تأثیرات لرزه‌ای بر ساختمان‌ها	مرور جامع تکنیک‌های مدل‌سازی SSI؛ مقایسه دستورالعمل‌ها و یافته‌ها	SSI دوره طبیعی سازه را افزایش داده و تغییر شکل طبقات را بیشتر می‌کند؛ نیاز به مدل‌های غیرخطی و به‌روزرسانی کدهای طراحی.	فاقد اعتبارسنجی تجربی؛ تأکید بر نیاز به مدل‌های ساده برای مهندسان عملی و بررسی سازه‌های نامنظم.

یافته‌های کلیدی این مقالات نشان می‌دهد که SSI می‌تواند تغییرات چشمگیری در رفتار سازه‌ها ایجاد کند، از جمله تأثیر بر دوره تناوب طبیعی، تغییر شکل طبقات، نشست فونداسیون، و شکنندگی لرزه‌ای سازه‌ها. برخی مقالات به

طور خاص بر تعامل سازه-حفاری و خطر برخورد سازه‌های مجاور تمرکز داشته‌اند، که در شرایط خاک نرم و فواصل ناکافی بین سازه‌ها، اثرات قابل توجهی را نشان داده‌اند.

جدول فوق علاوه بر ارائه یافته‌های کلیدی، محدودیت‌های هر مطالعه از جمله محدودیت‌های مربوط به نوع سازه‌ها، استفاده از مدل‌های خطی، و کمبود اعتبارسنجی تجربی، را نیز مشخص می‌کند. هدف از ارائه جدول ۲، تسهیل مقایسه و شفاف‌سازی شکاف‌های موجود در مطالعات SSI است تا مسیریابی برای تحقیقات آینده مشخص شود.

جدول شماره ۳ به مقالاتی اختصاص دارد که به بررسی پیشرفته‌ترین تکنیک‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در حوزه اندرکنش خاک و سازه (SSI) پرداخته‌اند. این مقالات بر موضوعاتی همچون تأثیر شمع‌های مات با پره بر پاسخ لرزه‌ای، کارایی میراگرهای ویسکوز در شرایط مختلف خاک، استفاده از ضریب اصلاح پاسخ SSI (RSSI)، و اثرات دینامیکی SSSI تمرکز دارند.

جدول ۳: بررسی پیشرفته مطالعات اندرکنش خاک و سازه (SSI) و تأثیر آن بر سیستم‌های لرزه‌ای.

ردیف	مرجع مقاله	حوزه تحقیق	روش شناسی	یافته های کلیدی	محدودیت ها و تحقیقات آتی
۱۱	[۴۲]	بررسی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه برای ساختمان‌های بلند بر روی شمع‌های مات با پره	تحلیل تاریخچه زمانی با طول‌های متفاوت پره (Lf)؛ نرم‌افزار ABAQUS	شمع‌های مات با پره پاسخ لرزه‌ای را تا ۹۸٪ کاهش می‌دهند؛ طول بهینه پره $L_{p0.6}$ است.	محدود به تحریک‌های لرزه‌ای دور از کانون؛ نیاز به اعتبارسنجی برای زلزله‌های نزدیک کانون.
۱۲	[۱۷]	تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد میراگرهای ویسکوز در ساختمان‌های بلند	تحلیل دینامیکی با استفاده از پارامترهای انرژی؛ ارزیابی کارایی میراگرها	در خاک‌های نرم، اندرکنش کارایی میراگرهای ویسکوز را کاهش می‌دهد؛ در خاک‌های سخت عملکرد میراگرها بهبود می‌یابد.	تمرکز بر ساختمان‌های بلند با میراگرهای ویسکوز؛ پیشنهاد مدل‌های غیرخطی خاک برای مطالعات آینده.
۱۳	[۴۳]	رویکرد احتمالاتی برای در نظر گرفتن SSI در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها	ضریب اصلاح پاسخ SSI (RSSI) مبتنی بر ریسک؛ رویکرد طراحی احتمالاتی	RSSI ریسک یکنواخت خرابی را تضمین می‌کند؛ کدهای موجود ممکن است خطرات خاک‌های محکم را دست کم بگیرند.	نیاز به کالیبراسیون برای انواع سازه‌های دیگر؛ تأکید بر تحلیل عدم قطعیت.
۱۴	[۴۴]	اثرات دینامیکی SSSI در ساختمان‌های بلند مجاور با فونداسیون شمع-مات	شبیه‌سازی سه‌بعدی المان محدود؛ بررسی اثرات SSSI بر ساختمان‌های مجاور	اثرات SSSI به ویژگی‌های سازه بستگی دارد؛ فاصله نزدیک ($B > 0.3$) اثرات SSSI را تشدید می‌کند.	تحلیل چیدمان‌های خاص سازه‌ای؛ پیشنهاد مطالعات بر روی ترکیب‌های متنوع شهری.
۱۵	[۴۵]	آزمایش‌های میز لرزه در مقیاس بزرگ برای PSSI با میراگرهای ویسکوز	آزمایش‌های میز لرزه و مدل‌سازی عددی سه‌بعدی؛ ارزیابی اثرات PSSI	PSSI اوج شتاب را کاهش می‌دهد اما تغییر مکان کلی را افزایش می‌دهد؛ عملکرد میراگرها با PSSI کاهش می‌یابد.	محدود به خاک‌های نرم و فونداسیون شمع؛ نیاز به مطالعات روی سیستم‌های فونداسیون و خاک‌های مختلف.

یافته‌های کلیدی نشان می‌دهد که SSI و SSSI می‌توانند اثرات پیچیده‌ای بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها داشته باشند و عملکرد سازه‌ها به عواملی نظیر ویژگی‌های خاک، نوع فونداسیون، فاصله بین سازه‌ها، و نوع میراگر بستگی دارد. این مقالات همچنین شکاف‌های تحقیقاتی قابل‌توجهی را شناسایی کرده‌اند، از جمله نیاز به تحلیل‌های غیرخطی، اعتبارسنجی تجربی، و توسعه روش‌هایی برای ترکیب‌های متنوع‌تر سازه‌ها و خاک‌ها. هدف از این جدول، شفاف‌سازی روندهای تحقیقاتی و کمک به شناسایی محدودیت‌ها و مسیرهای آینده برای تحقیقات SSI است.

۵- نتیجه گیری:

مطالعه حاضر با مرور سیستماتیک و تحلیل ۱۵ مقاله برتر در زمینه اندرکنش خاک و سازه (SSI) و تأثیر آن بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، تصویری جامع از وضعیت کنونی این حوزه تحقیقاتی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که SSI نقشی پیچیده و دوجانبه در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دارد، به گونه‌ای که می‌تواند بسته به شرایط خاک، نوع فونداسیون، و طراحی سازه، اثرات مثبت یا منفی بر عملکرد لرزه‌ای داشته باشد. یافته‌های کلیدی نشان دادند که:

۱- تأثیرات SSI بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها: افزایش دوره تناوب طبیعی، تغییر شکل بیشتر طبقات، و تأثیر قابل‌توجه بر منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای از مهم‌ترین پیامدهای SSI هستند. در شرایط خاک نرم، این اثرات تشدید شده و نیاز به تحلیل دقیق‌تری دارند.

۲- نقش تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته: استفاده از روش‌های عددی مانند SASSI، FEM، و شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی، به درک بهتر اثرات SSI و تعاملات پیچیده‌تر مانند SSSI کمک کرده است. با این حال، نیاز به توسعه مدل‌های غیرخطی و اعتبارسنجی تجربی همچنان احساس می‌شود.

۳- کارایی سیستم‌های لرزه‌ای در حضور SSI: بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های کاهش انرژی مانند میراگرهای ویسکوز در شرایط خاک نرم کارایی کمتری دارند، درحالی‌که در خاک‌های سخت عملکرد آن‌ها بهبود می‌یابد. این موضوع ضرورت در نظر گرفتن شرایط خاک در طراحی عملکرد-محور را برجسته می‌کند.

۴- شکاف‌های تحقیقاتی: مطالعات فعلی عمدتاً بر سناریوهای خاصی مانند خاک نرم یا ساختمان‌های متقارن متمرکز هستند. همچنین، نیاز به تحلیل‌های احتمالاتی گسترده‌تر، اعتبارسنجی آزمایشگاهی، و توسعه دستورالعمل‌های به‌روز برای طراحی لرزه‌ای در حضور SSI وجود دارد.

۶- پیشنهادات برای تحقیقات آینده:

با توجه به شکاف‌های شناسایی‌شده، تحقیقات آینده می‌توانند بر موارد زیر تمرکز کنند:

۱. توسعه مدل‌های غیرخطی دقیق‌تر برای تعامل خاک و سازه و اعتبارسنجی آن‌ها با داده‌های تجربی.
۲. تحلیل تأثیر SSI در سازه‌های نامتقارن، سیستم‌های شهری متراکم، و ترکیبات پیچیده سازه-خاک-سازه (SSSI).

۳. ایجاد دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای جدید که اثرات SSI را به صورت جامع‌تر و عملی‌تر در نظر بگیرد.

این مطالعه به وضوح نشان داد که عدم توجه به SSI می‌تواند منجر به طراحی غیرایمن و کاهش عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها شود. بنابراین، ادغام ملاحظات SSI در کدهای طراحی و توسعه مدل‌های پیشرفته می‌تواند گامی مهم در افزایش ایمنی و پایداری ساختمان‌ها در برابر زلزله باشد.

۷- مراجع:

- [1] Ohsaki, Y. (1966). Niigata earthquakes, 1964 building damage and soil condition. SoilsFound. 6, 14–37. doi:10.3208/sandf1960.6.2_14
- [2] Kramer, S. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Upper Saddle River, NJ): Prentice-Hall.
- [3] Stewart, J., and Kramer, S. (2004). Geotechnical aspects of seismic hazards. Earthq. Eng. doi:10.1201/9780203486245.ch4
- [4] Kausel, E. (2010). Early history of soil-structure interaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(9), 822-832.
- [5] Bielak, J. (1974). Dynamic behaviour of structures with embedded foundations. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 3, 259–274. doi:10.1002/eqe.4290030305
- [6] Johnson and Asfura A P, "Soil-Structure Interaction (SSI): Observations, Data, And Correlative Analysis," 1993.
- [7] Mylonakis, G., and Gazetas, G. (2000). Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental? J. Earthq. Eng. 4, 277–301. doi:10.1080/13632460009350372
- [8] Wolf, J. P. (1989). Soil-structure-interaction analysis in time domain. Nuclear engineering and design, 111(3), 381-393.
- [9] Dutta, S. C., and Roy, R. (2002). A critical review on idealization and modeling for interaction among soil-foundation-structure system. Comput. Struct. 80, 1579–1594. doi:10.1016/S0045-7949(02)00115-3
- [10] ASCE (2016). Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE/SEI 7-16).
- [11] ATC (1978). Tentative provisions for the development of seismic Regulations for buildings: A cooperative effort with the design professions, building code interests and the research community.
- [12] EN 1998-5 (2004). Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- [13] Kraus, I., and Džakić, D. (2013). Soil-structure interaction effects on seismic behaviour of reinforced concrete frames. Conference: SE-50EEEEAT: Skopje, Makedonija .
- [14] Scholl, R. E. (1989). Observations of the performance of buildings during the 1985 Mexico earthquake, and structural design implications. Int. J. Min. Geol. Eng. 7, 69–99. doi:10.1007/BF01552841
- [15] Menglin and W Jingning, "Effects Of Soil-Structure Interaction On Structural Vibration Control."
- [16] Kumar and S S Mishra, "Dynamic response of buildings on different types of foundations through shake table tests considering SSI effect," International Journal of Civil Engineering and Technology, vol. 9, no. 8, pp. 205–216, 2018.
- [۱۷] کریمیان قاشقای، احمد و ملکی نژادشهریابی، محسن. ۱۴۰۲. اثر اندرکنش خاک و سازه بر کارایی میراگر ویسکوز، در ساختمان بلند، هشتمین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی و پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا، <https://civilica.com/doc/1948039>
- [18] Naserkhaki, S.; Aziz, F.N.A.; Pourmohammad, H. Earthquake induced pounding between adjacent buildings considering soil-structure interaction. Earthq. Eng. Eng. Vib. 2012, 11, 343–358.

- [19] Kazemi, F.; Miari, M.; Jankowski, R. Investigating the effects of structural pounding on the seismic performance of adjacent RC and steel MRFs. *Bull. Earthq. Eng.* 2021, 19, 317–343
- [20] Raychowdhury, P., & Ray-Chaudhuri, S. (2015). Seismic response of nonstructural components supported by a 4-storey SMRF: Effect of nonlinear soil-structure interaction. *Structures*, 3, 200-210. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.04.006
- [21] Bapir, B.; Abrahamczyk, L.; Wichtmann, T.; Prada-Sarmiento, L.F. Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Front. Built Environ.* 2023, 9, 1120351.
- [22] Kontoni, D.P.N.; Farghaly, A.A. Enhancing the earthquake resistance of RC and steel high-rise buildings by bracings, shear walls and TMDs considering SSI. *Asian J. Civ. Eng.* 2023, 24, 2595–2608
- [23] MacCalden, P. B. (1969). Transmission of steady-state vibrations between rigid circular foundations. University of California, Los Angeles.
- [24] D. Clouteau, D. Broc, G. Devésá, V. Guyonvarh, and P. Massin, "Calculation methods of Structure–Soil–Structure Interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC tests," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 129-142, 2012.
- [25] Gajan S, Raychowdhury P, Hutchinson TC, Kutter BL, Stewart JP. Application and validation of practical tools for nonlinear soil-foundation interaction analysis. *Earthquake Spectra* 2009; 26: 111-129. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.3263242>.
- [26] Raychowdhury P, Hutchinson TC. Performance evaluation of a nonlinear winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2009; 38: 679-698. DOI: 10.1002/eqe.902.
- [27] J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, "Finite dynamic model for infinite media," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 95, pp. 859-878, 1969.
- [28] H. L. Wong and J. E. Luco, "Dynamic interaction between rigid foundations in a layered half-space," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 5, pp. 149-158, 1986.
- [29] H. T. Lin, J. Roesset, and J. Tassoulas, "Dynamic interaction between adjacent foundations," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 15, pp. 323-343, 1987.
- [30] Rodríguez-Galván, E, Álamo, GM, Medina, C and Maeso, O 2023. Influence of seabed profile on the seismic response of monopile-supported offshore wind turbines including dynamic soil-structure interaction. *Marine Structures*, 92, 103500. <https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2023.103500>
- [31] Poulos, HG and Davis, EH (1980) *Pile foundation analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [32] Requena-Garcia-Cruz, M. V., Bento, R., Durand-Neyra, P., & Morales-Esteban, A. (2022, April). Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. In *Structures* (Vol. 38, pp. 599-617). Elsevier.
- [33] Sriwastav, R. K. (2022). Seismic vulnerability assessment of RC high-rise building considering soil–structure interaction effects. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(4), 585-608.
- [34] Zhan, P., Xue, S., Li, X., Sun, G., & Ma, R. (2024). Seismic assessment of large-span spatial structures considering soil–structure interaction (SSI): A State-of-the-Art Review. *Buildings*, 14(4), 1174
- [35] Dhadse GD, Ramtekkar G, Bhatt G. Thin layer interface: An alternative modeling consideration in soil-structure interaction system. *Res. Eng. Struct. Mater.*, 2024; 10(3): 1173- 1194
- [36] Krishnan, R., & Sivakumar, V. L. (2024). The Effect of Soil-Structure Interaction (SSI) on Structural Stability and Sustainability of RC Structures. *Civ. Environ. Eng. Rep*, 34, 116-136.
- [37] Bolisetti, C., & Whittaker, A. S. (2020). Numerical investigations of structure-soil-structure interaction in buildings. *Engineering Structures*, 215, 110709.
- [38] Ebadi-Jamkhaneh, M. (2024). Pounding Risk Assessment through Soil–Structure Interaction Analysis in Adjacent High-Rise RC Structures. *Buildings*, 14(9), 2779.
- [39] Yeganeh, N., Bazaz, J. B., & Akhtarpour, A. (2015). Seismic analysis of the soil–structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 79, 149-170.
- [40] Hoseyni, S. M., Yousefpour, F., Araei, A. A., Karimi, K., & Hoseyni, S. M. (2014). Effects of soil-structure interaction on fragility and seismic risk; a case study of power plant containment. *Journal of Loss Prevention in the Process industries*, 32, 276-285.

[41] Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., & Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1120351.

[42] Bariker, P., & Kolathayar, S. (2022). Dynamic soil structure interaction of a high-rise building resting over a finned pile mat. *Infrastructures*, 7(10), 142

[43] Vaseghiamiri, S., Mahsuli, M., Ghannad, M. A., & Zareian, F. (2020). Probabilistic approach to account for soil-structure interaction in seismic design of building structures. *Journal of Structural Engineering*, 146(9), 04020184.

[44] Gan, J., Li, P., & Liu, Q. (2019). Study on dynamic structure-soil-structure interaction of three adjacent tall buildings subjected to seismic loading. *Sustainability*, 12(1), 336

[45] Yang, J., Lu, Z., & Li, P. (2020). Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 220, 110960.