

# ارزیابی نشست و پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با لحاظ اندرکنش خاک-سازه مبتنی بر نتایج بارگذاری استاتیکی و مدل‌سازی محیط پیوسته

مژگان سلیمانی<sup>۱</sup>، حسین پهلوان<sup>۲\*</sup>، محمد شامخی امیری<sup>۳</sup>، نیما دری نیا<sup>۴</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، مشهد، ایران mozhgansoleimani1366@gmail.com

۲- استادیار گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، pahlavan@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار گروه سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، مشهد، ایران، nimadorrinia@gmail.com

## چکیده

ساختمان‌های بلند همواره مورد توجه پژوهشگران و طراحان سازه بوده‌اند. اگرچه تحلیل لرزه‌ای این سازه‌ها در مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد، اثرات اندرکنش خاک و سازه معمولاً کمتر مورد توجه قرار گرفته است. درواقع، لحاظ کردن اثرات اندرکنش خاک و سازه در تحلیل‌های لرزه‌ای، تخمین‌هایی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر از عملکرد سازه در زمان زلزله ارائه می‌دهد. در این پژوهش، تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با تکیه‌گاه پی گسترده و شمع (پی عمیق) بررسی شده است. هدف اصلی ارزیابی میزان نشست پی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و مقایسه آن با حالت پایه ثابت (عدم لحاظ اثرات خاک) است. برای این منظور، یک ساختمان ۳۳ طبقه با سیستم سازه‌ای قاب هسته‌ای در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی، تحلیل و طراحی شد. جهت تحلیل دقیق‌تر اثر اندرکنش سازه-خاک-شمع-پی، از نرم‌افزار مدل‌سازی محیط پیوسته خاک MIDAS GTS NX استفاده و نشست پی در شرایط محیط پیوسته محاسبه گردید. مقایسه نتایج این تحقیق با تحلیل‌های مبتنی بر مدل فنر وینکلر در نرم‌افزارهای غیر پیوسته نشان داد نشست پی در تحلیل با اندرکنش خاک و سازه بیشتر از مقادیر مدل فنر وینکلر است. همچنین، لحاظ اثرات خاک در تحلیل موجب کاهش نشست پی نسبت به حالت پایه ثابت می‌شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن اثرات خاک منجر به افزایش جابجایی بین طبقه‌ای در تحلیل لرزه‌ای سازه گردید. این نتایج اهمیت بالایی در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه در تحلیل و طراحی ساختمان‌های بلند را به‌وضوح نشان می‌دهد.

## کلمات کلیدی

اندرکنش لرزه‌ای خاک، شمع و سازه، عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها، مدل‌سازی محیط پیوسته، المان محدود، سازه بلند

توجه به استحکام ساختمان‌های بلندمرتبه در برابر زلزله‌ها و بادهای شدید از دغدغه‌های اصلی مهندسان عمران در طراحی و اجرای این نوع سازه‌ها است، به خصوص با در نظر گرفتن خطرات ژئوتکنیکی. در سال‌های اخیر، چندین زلزله مخرب رخ داده که در آن‌ها بسیاری از ساختمان‌ها به شدت آسیب دیده‌اند. بنابراین، بازنگری و به‌روزرسانی مستمر استانداردهای مربوطه و همچنین تحقیق و توسعه در زمینه مواد و روش‌های جدید ساخت، می‌تواند یکی از مهم‌ترین گام‌ها در جهت بهبود طراحی و اجرای ساختمان‌های بلندمرتبه و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر بلایای طبیعی باشد. مشاهدات آسیب و تحلیل‌های دقیق سازه‌ای نشان داده است که در نظر گیری اندرکنش خاک و سازه (SSI) می‌تواند به طور قابل توجهی ظرفیت و پارامترهای سازه‌ای مربوط به تقاضا (مانند دوره ارتعاش، ظرفیت رانش و غیره) و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای را تغییر دهد. بنابراین در نظر گیری اثرات SSI برای طراحی و ارزیابی ساختمان‌ها ضروری می‌باشد. در نظر گرفتن SSI در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها باعث می‌شود که حرکت زمین در سطح پی تحت تاثیر خواص خاک، مسیر موج، اثرات سایت و هندسه خاک قرار گیرد. در تحلیل سازه‌ها، اغلب اثرات اندرکنش خاک و سازه نادیده گرفته می‌شود، و پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها به گونه‌ای ارزیابی می‌شود که گویی شالوده آن‌ها صلب است. با این حال، در هنگام وقوع زلزله‌ها، خاک زیرین سازه دچار تغییر شکل‌هایی می‌شود که تحت تاثیر بارهای وارده از شالوده سازه است. این تغییرات در خاک، به نوبه خود، بر پاسخ دینامیکی سازه تأثیر می‌گذارند. در واقع، رفتار متقابل بین سازه و خاک زیرین و اطراف آن در زمان زلزله، مفهوم اندرکنش خاک و سازه را مطرح می‌کند. [۴۹]

در تحلیل‌های لرزه‌ای سازه، تمرکز اصلی بر روی میزان و زمان توانایی سیستم‌های مقاوم جانبی در پاسخ به نیروهای زلزله و شکل‌پذیری آن‌ها است؛ اما اغلب، تاثیر رفتار خاک زیرین بر پاسخ لرزه‌ای سازه کمتر در نظر گرفته می‌شود. در هنگام وقوع زلزله، پاسخ سازه (نیروها و تغییر مکان‌ها) و پاسخ زمین (جابجایی و شتاب حرکت) به یکدیگر وابسته هستند. بارهای انتقالی از سازه به پی، نه تنها بر شالوده بتنی تأثیر می‌گذارند، بلکه بر خاک زیر و اطراف شالوده نیز تأثیر می‌گذارند و تنش‌ها و تغییر شکل‌هایی در آنها ایجاد می‌کنند. به طوری که حتی وجود یک سازه می‌تواند نحوه ارتعاش زمین اطراف خود را نسبت به حالتی که سازه‌ای روی خاک قرار ندارد (یعنی حالت میدان آزاد) تغییر دهد. از سوی دیگر، تغییر شکل‌های شالوده و خاک می‌توانند به نوبه خود خصوصیات و پاسخ دینامیکی سازه را تغییر دهند. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که سازه، شالوده و خاک (زیر و اطراف شالوده) جمعا به عنوان یک سیستم واحد رفتار می‌کنند که ویژگی‌های هریک بر دیگری نیز تاثیر گذاشته و در اصطلاح روی همدیگر اثر متقابل یا اندرکنش دارند. بنابراین، این موضوع اهمیت در نظر گرفتن اندرکنش را بیش از پیش نمایان می‌سازد. [۲-۳].

وایت من و همکاران (۱۹۶۷) روش‌های عملی برای تحلیل پی‌های تحت بارگذاری دینامیکی مورد بحث قرار دادند و روش‌های طراحی پیشنهاد کردند. این روش‌ها از سیستمی از جرم‌های متمرکز، فنرها و ضربه‌گیرها استفاده می‌کنند که تقریباً معادل سیستم خاک واقعی پی است. مرحله کلیدی ارزیابی پارامترهای متمرکز سیستم از نظریه‌های پی‌های مستقر بر روی اجسام الاستیک نیمه نامتناهی بدست آمد. [۵].

لوئیزی و همکاران (۲۰۲۰) اثرات غیرخطی SSI و عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند با استفاده از شبیه سازی‌های عددی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که شرایط گیرداری همیشه محافظه کارانه نیستند و اثرات SSI در ساختمان‌های بلند بر توزیع محاسبه شده تقاضای مهندسی در طول ارتفاع سازه تأثیر می‌گذارد. از جمله جلوه‌های حرکت زمین دو طرفه در ساختمان‌های بلند با افزایش SSI پارامترهای تقاضای مهندسی زمانی که با مفروضات پایه گیردار مقایسه می‌شود که می‌تواند منجر به محاسبه واقعی‌تر تقاضاهای لرزه‌ای در عملکرد سازه ای یا ژئوتکنیکی فعلی شود. [۶]

حسین تحقیقی و علی محمدی (۲۰۲۰) مطالعه‌ای باهدف اینکه آیا عملکرد لرزه‌ای و آسیب پذیری سازه‌های بتن مسلح RC که تحت تأثیر اندرکنش خاک و سازه SSI قرار دارند، وجود دارد یا نه انجام داد. نتایج عددی نشان داد که SSI بر روی شکنندگی و عملکرد پی صلب سازه‌ها نقش قابل توجهی دارد. [۷] جیم مرکادو و همکاران در سال ۲۰۲۱ ویژگی‌های خاک و سازه را ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که سرعت موج برشی و نسبت ابعاد ساختمان در طولانی شدن دوره در ساختمان‌های بلند تأثیر می‌گذارد. آنها شبیه

سازی‌های عددی را با استفاده از اپنسیس توسعه دادند. قلمرو خاک با استفاده از کرنش چهار ضلعی نه گره ای مدل‌سازی شد عناصری که قادر به شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی هستند. [۸] همچنین لویاوو (۲۰۲۳) به پیش‌بینی نشست پی ساختمان‌ها در شهر هوشمند پرداخت. [۹] دری نیا و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در دو حالت پایه ثابت و حالت در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه پرداختند، نتایج تحقیق آنها بر ضرورت لحاظ اندرکنش خاک-سازه بر نتایج منطبق بر واقعیت دلالت داشت. [۱۰] مارتیروسیان و همکارانش (۲۰۲۳) به بررسی نشست پی بر بستر ماسه‌ای غیر اشباع پرداختند. [۱۱] تحقیقات اخیر نشان دهنده ضرورت لحاظ اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. همچنین نوآوری اصلی این تحقیق در ترکیب مدل‌سازی پیشرفته محیط پیوسته خاک با تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه و ارزیابی دقیق اثرات اندرکنش خاک-سازه-شمع-پی است که منجر به ارائه نتایج واقعی‌تر و کاربردی‌تر برای طراحی مقاوم در برابر زلزله می‌شود. این رویکرد می‌تواند به بهبود ایمنی و عملکرد سازه‌های بلند در برابر زلزله کمک شایانی نماید.

با وجود مطالعات گسترده‌ای که تاکنون پیرامون تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند انجام شده است، بررسی‌های اندکی به ارزیابی اثر این اندرکنش بر پارامترهایی نظیر نشست، تنش‌های وارده بر خاک زیر پی و نیروهای منتقل شده به شمع‌ها و همچنین تأثیر لحاظ اندرکنش خاک-سازه در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های بلند پرداخته‌اند. در این پژوهش، از مدل‌سازی دقیق محیط پیوسته زیرسازه در نرم‌افزار Midas که قابلیت مدل‌سازی محیط پیوسته خاک و همچنین امکان تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تر اندرکنش خاک-سازه-شمع-پی را دارد استفاده شد. نرم‌افزار Midas به طور ویژه برای تحلیل‌های دینامیکی، از جمله بررسی اثر بارگذاری لرزه‌ای و اندرکنش خاک و سازه، توسعه یافته است و می‌تواند رفتار غیرخطی خاک و سازه را به خوبی شبیه‌سازی کند. [۱۰] علاوه بر این صحت‌سنجی مدل با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع‌ها، تأثیر اندرکنش خاک و سازه هم بر پاسخ لرزه‌ای سازه و هم بر عملکرد ژئوتکنیکی زیرسازه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که لحاظ کردن اثرات واقعی اندرکنش خاک و سازه در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، نقش بسیار مؤثری در افزایش دقت تحلیل‌ها و ایمنی سازه ایفا می‌کند. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان گامی مؤثر در جهت بهبود روش‌های طراحی عملکردمحور ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گیرند.

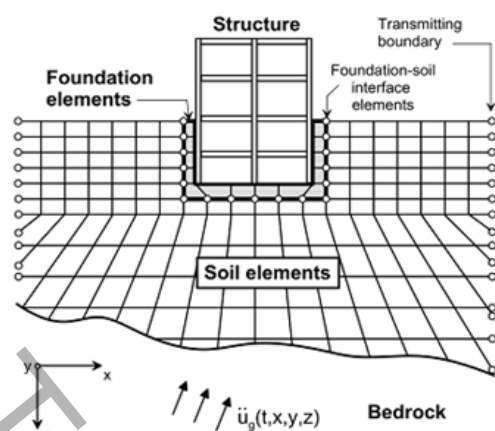
## ۲- اندرکنش خاک و سازه

در سال‌های اخیر، توجه به اثر خاک در تحلیل‌های لرزه‌ای به طور فزاینده‌ای افزایش یافته و این موضوع در دهه اخیر در آیین‌نامه‌های بین‌المللی نیز مورد تأکید قرار گرفته است. بر این اساس، طراحان سازه‌های مهندسی، چه بزرگ و چه متوسط، به دانش عمیقی از اندرکنش خاک و سازه نیاز دارند. با توجه به تعامل بین سازه و خاک اطراف، تحلیل لرزه‌ای مستقل از سازه نمی‌تواند نتایج دقیق و واقع‌بینانه‌ای ارائه دهد. سازه‌های بلند، به عنوان اولین دسته‌ای که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای آن‌ها حیاتی است، مطرح می‌شوند. [۱]

## ۳- تئوری و روش حل مسئله

در تحلیل اندرکنش خاک و سازه، دو روش شایع وجود دارد: روش زیرسازه و روش مستقیم. در روش زیرسازه، معمولاً خاک، پی و سازه به طور جداگانه و به عنوان یک زیرسازه مدل می‌شوند. به عبارت دیگر، در این روش، سازه و زمین به صورت مستقل تحلیل می‌شوند و ارتباط بین آن‌ها توسط نیروهای اندرکنشی برقرار می‌شود. این روش از اصل جمع آثار قوا استفاده می‌کند و بنابراین، به طور عمده برای تحلیل رفتارهای خطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ تصویر شماتیکی از اثرات لرزه‌ای اندرکنش خاک و سازه را نشان می‌دهد. روش مستقیم یکی از روش‌های رایج در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه است. در این روش، اندرکنش سینماتیک و اندرکنش اینرسی‌دار از هم جدا نمی‌شوند و اثرات ارتعاش سازه و پی به طور مستقیم در معادلات تعادل دینامیکی مشاهده می‌شوند. بنابراین، تحریک ورودی در مرز پایین مدل اعمال می‌شود و امواج آن پس از عبور از لایه‌های خاک وارد سازه می‌شوند. سپس،

سازه به ارتعاش در می‌آید و امواج لرزه‌ای جدید از سازه به سمت پی انتشار می‌یابند، که به آن مدل محیط پیوسته نیز اشاره می‌شود. در این تحقیق، از این روش بهره برده شده است. [۹ و ۱۰]



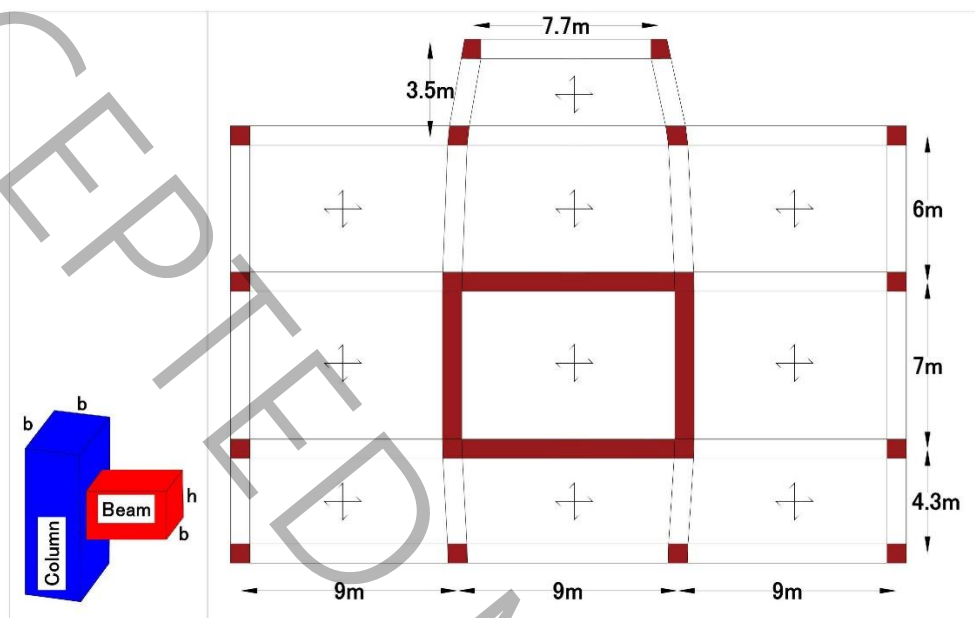
شکل ۱: تصویر شماتیک اثرات اندرکنش لرزه ای بین خاک-سازه

Fig. 1. Schematic diagram of the effects of seismic soil-structure interaction

#### ۴- مشخصات سازه و خاک

ساختمان مورد مطالعه یک سازه بلند مرتبه‌ی ۳۳ طبقه با کاربری مسکونی ساخته شده در شهر بابلسر که با خطر نسبی زیاد قرار دارد. می‌باشد. سیستم مهار جانبی از یک سیستم قاب هسته استفاده گردید. ارتفاع طبقه اول ۴ m و سایر طبقات ۳/۵ m است. همچنین ارتفاع کل سازه ۱۱۶ m می‌باشد. تیرها و ستون‌ها با استفاده از عنصر قاب مدل‌سازی شده‌اند، هرچند روش‌های مدل‌سازی به لغزش طولی میلگرد در ناحیه مفصل پلاستیک نمی‌پردازند، در اغلب آیین‌نامه‌های لرزه‌ای هم به علت تفسیر دشوار آن در نظر گرفته نمی‌شود. ضخامت دال بتنی و افل ۰/۳ m می‌باشد. سر بار زنده طبقات مسکونی  $200 \text{ kg/m}^2$  و بار مرده اضافی دال‌های طبقات  $160 \text{ kg/m}^2$  لحاظ شده است. با توجه به وزن ساختمان و مقاومت خاک بکارگیری از یک شمع عمیق و یک پی گسترده (سرشمع) با صلبیت مناسب برای پخش بارها بین آن الزامی است. البته بدون ملاحظات مربوط به نشست ظرفیت باربری این پی گسترده به ابعاد ۳۰ m در ۴۶ m و عمق ۴ m در حالت ثقلی  $4/2 \text{ kg/cm}^2$  و در حالت لرزه‌ای  $5/6 \text{ kg/cm}^2$  گزارش شده است. همچنین بدون ملاحظات نشست مجاز، ظرفیت باربری مجاز خاک زیر پی گسترده این سازه بیشتر از تنش موجود می‌باشد. (تنش موجود زیر خاک پی در حالت لرزه‌ای  $3/75 \text{ kg/cm}^2$  و در حالت ثقلی برابر  $2/9 \text{ kg/cm}^2$  می‌باشد) ولی نشست‌های موجود پی گسترده این سازه بدون در نظر گرفتن شمع‌ها بیشتر از نشست مجاز آیین‌نامه‌ها و در حدود ۴۰ cm می‌باشد. بنابراین در این سازه از پی گسترده به همراه شمع استفاده شده است و در مدل‌سازی آن که توسط نرم افزار MIDAS انجام شده، لحاظ گردید. در شکل ۲ پلان ستون گذاری سازه مورد مطالعه قابل مشاهده است. همچنین ابعاد ستون‌ها و تیرهای طبقات مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شد. جهت بررسی شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه سه عدد گمانه به عمق ۶۰ m از سطح زمین حفاری شده است، گمانه‌ها به صورت ماشینی توسط شرکت مشاور حفاری شده‌اند. در حین حفاری در اعماق مختلف نمونه‌هایی جهت آزمایش تهیه و همچنین اقدام به آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) طبق استاندارد ASTM-D1586 گردیده است و در نزدیکی سطح زمین فاصله انجام آزمایش‌ها کمتر و با افزایش عمق این فاصله افزایش یافته است. پس از توقف حفاری، نمونه گیر آزمایش SPT به عمق مورد نظر فرستاده شد و به آن وزنه  $63/5 \text{ kg}$  که از ارتفاع ۷۶/۲ cm سقوط میکند، ضرباتی نواخته شد تا در خاک کف گمانه فرو رود به ازاء ۱۵ cm نفوذ تعداد ضربات یادداشت گردید و اینکار برای سه تا ۱۵ cm انجام شد. تعداد ضربات مربوط به دو مرحله ۱۵ cm آخر به عنوان عدد SPT محسوب می‌شود. در این مطالعه از گمانه BH3 جهت تعیین

پارامترهای خاک مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات سرعت موج برشی و داده‌های تست نفوذ استاندارد (SPT) برای محاسبه  $E_s$  (مدول الاستیسیته خاک) اتخاذ شد. این محاسبات تا عمق ۶۰ m لحاظ گردید.



شکل ۲: پلان ستون گذاری سازه

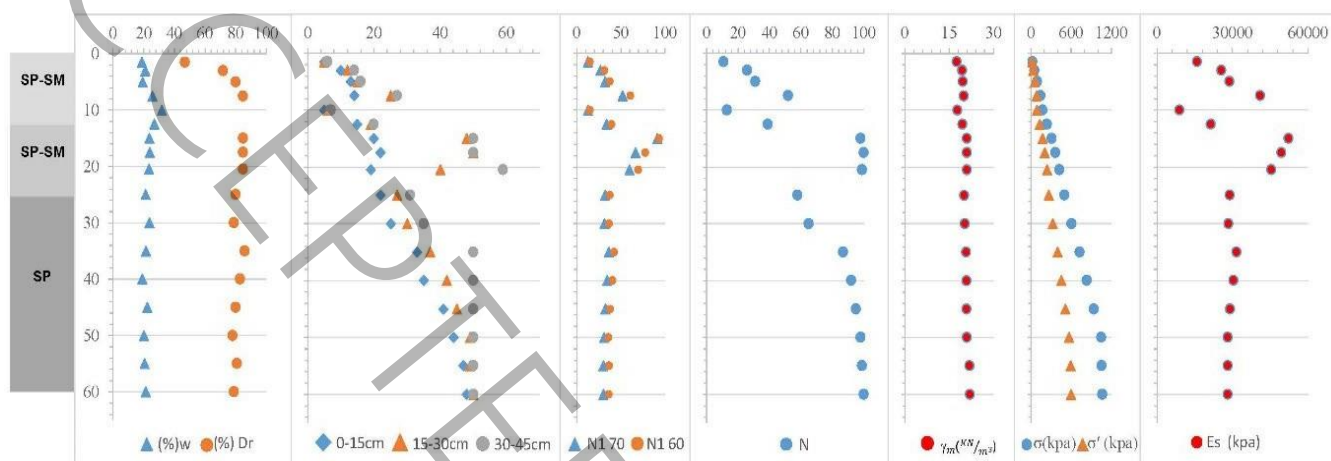
Fig. 2. Structural column layout plan

جدول ۱: ابعاد تیر و ستون های طبقات سازه

Table 1. Dimensions of beams and columns in building floors

| تیر (b*h) (cm) | ستون (b*b) (cm) | طبقه  |
|----------------|-----------------|-------|
| ۸۵*۹۰          | ۹۰*۹۰           | ۱-۹   |
| ۸۵*۶۵          | ۸۰*۸۰           | ۳۳-۱۰ |

شکل ۳ اعداد نفوذ استاندارد در اعماق مختلف، درصد رطوبت ( $w$ )، چگالی نسبی ( $D_R$ )، عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده برای خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه ( $N_{160}$ ،  $N_{170}$ )، وزن مخصوص مرطوب ( $\gamma_m$ )، تنش عمودی کل ( $\sigma$ ) و تنش عمودی مؤثر ( $\sigma'$ ) و مدول الاستیسیته خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۳. خلاصه شرایط زیرسطحی مربوط به شهر بابلسر

Fig. 3. Summary of subsurface conditions in Babolsar city

بر اساس نتایج ارائه شده در گزارش ژئوتکنیک محل ساخت و نتایج آزمایش دانه‌بندی، نوع خاک طبق سیستم طبقه‌بندی یکپارچه تا عمق ۱۲ متر SP و SP-SM است. از عمق ۱۲ تا ۲۴ متر، شامل خاک ریزدانه در گروه SP-SM است. نوع خاک از عمق ۲۴ تا ۶۰ متر SP است.

## ۵- مدل‌سازی و مشخصات

### ۵-۱ مدل‌سازی عددی

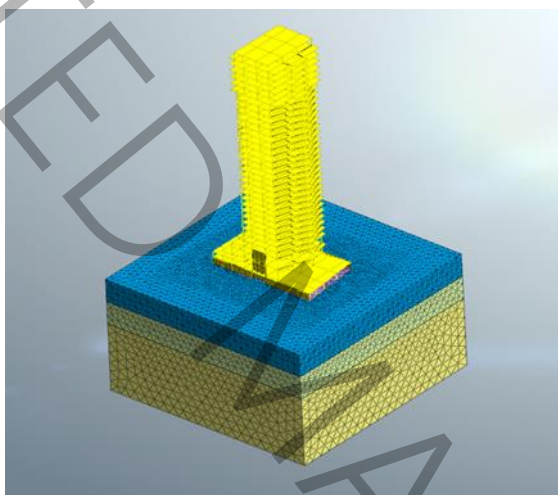
ابتدا سازه مورد نظر در نرم افزار ETABS و مطابق با آیین نامه ۲۸۰۰ ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است. سیستم سازه مورد مطالعه از نوع قاب خمشی به همراه دیوار برشی ویژه می‌باشد. به منظور مدل‌سازی سیستم خاک-سازه و حل معادلات پیچیده و شرایط مرزی و هندسی، نرم افزار المان محدود MIDAS GTS NX بکار گرفته شده است. این نرم افزار برای مدل‌سازی سازه به همراه خاک و پی جهت تحلیل مسائل اندرکنش استفاده می‌شود. (لی ۲۰۲۰) [۱۰]

در نرم افزار ژئوتکنیکی MIDAS سه لایه خاک به ضخامت‌های ۱۲m، ۱۲m و ۳۶m با ابعاد ۱۰۰m × ۱۰۰m مدل شده است. با توجه به موقعیت ساختگاه و مشخصات سازه و همچنین گزارش شرکت مشاور پی گسترده به تنهایی کفایت لازم را جهت ظرفیت باربری نداشته لذا در طراحی از ۱۰۰ عدد شمع استفاده شده است. شمع‌ها به قطر ۱/۲m و طول ۳۰m و ۲۵m مطابق نقشه اجرا شده مدل سازی شد. خاک مورد مطالعه دارای سه لایه می‌باشد. مشخصات لایه‌های خاک در جدول ۲ گزارش شده است. خاک این زمین در اعماق حدود ۸m و حدود ۱۷m ریزدانه و در بقیه اعماق درشت دانه و سطح آب زیرزمینی نیز در عمق ۵m و از ظرفیت باربری نسبتاً خوبی

برخوردار می باشد. پی گسترده با عمق استقرار ۲,۲m نسبت به تراز خیابان و ابعاد ۳۰ m در ۴۶ m در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمایی از مدل سازی ساختمان و لایه های خاک نشان می دهد.

جدول ۲: مشخصات و لایه های خاک مورد مطالعه  
Table 2. Soil properties and layers under study

| شماره لایه | ضخامت لایه<br>m | مدول الاستیسیته<br>kg/cm <sup>2</sup> | زاویه اصطکاک داخلی<br>deg | وزن مخصوص<br>kg/m <sup>3</sup> | نوع خاک |
|------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------|
| لایه اول   | ۱۲-۰            | ۱۶۰                                   | ۳۵                        | ۱۹۰۰                           | SP-SM   |
| لایه دوم   | ۱۲-۲۴           | ۴۵۰                                   | ۳۷                        | ۲۰۰۰                           | SP-SM   |
| لایه سوم   | ۲۴-۶۰           | ۹۲۰                                   | ۴۰                        | ۲۱۰۰                           | SP      |



شکل ۴: سازه و لایه های خاک مدل شده در نرم افزار MIDAS gts nx

Fig. 4. Structure and soil layers modeled in MIDAS GTS NX software

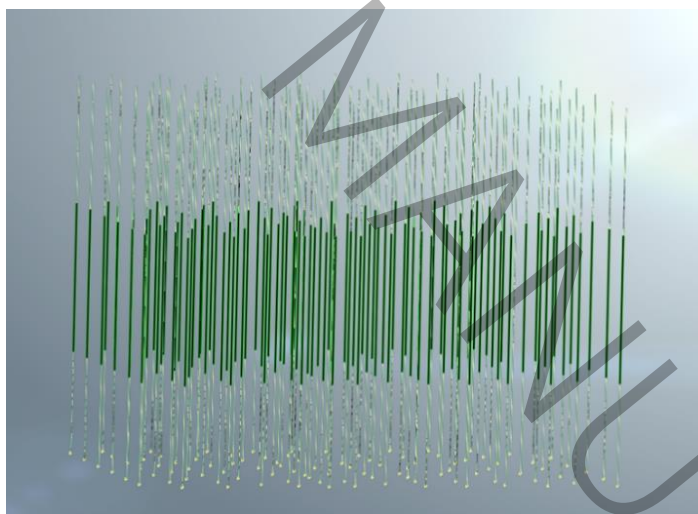
## ۵-۲ المان های خاک و سازه و شرایط مرزی

به منظور شبیه سازی رفتار المان های سازه الاستیک و رفتار غیرخطی محیط خاک موهر - کولمب به کار گرفته شده است. پارامترهای مدول الاستیسیته، وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی برای هر لایه خاک به طور جداگانه در نظر گرفته شد.

المان ها باید به گونه ای انتخاب شوند که از حذف بخش های با فرکانس بالای تحریک جلوگیری شود. بنابراین، با توجه به بالاترین فرکانس های ممکن تحریک ورودی و سرعت موج برشی خاک، ابعاد عناصر در بازه ای بین ۱/۵ تا ۱/۸ طول موج اولیه تحریک تعیین شدند و این طول موج با ضریبی مطابق با پیشنهاد رزیتانو و همکاران (۲۰۱۴) در نظر گرفته شد. [۱۳] در این مطالعه، مرز بی نهایت با استفاده از میدان آزاد شبیه سازی شد و مدل برای دستیابی به شرایط بهینه و جلوگیری از بازتاب موج در محدوده مرزی، در میدان آزاد اجرا گردید. مرزهای افقی مدل توسط مرزهای جانبی تعریف و این مرزها از طریق دمپره های ویسکوز به فضای باز متصل شدند. مقادیر ضرایب دمپره های ویسکوز با توجه به موج های P و S به صورت خودکار توسط نرم افزار MIDAS GTS NX ارزیابی شدند. بستر سنگی با شرایط مرزی سخت مدل سازی گردید و تحلیل های SSI انجام شد. تحریک مستقیم به گره های پایین ترین سطح مدل مطابق

با مطالعه ریحانی و نجار ۲۰۰۸ اعمال گردید. [۱۴] مدل سازی رفتار رابط پی و خاک مجاور ضروری است و در این راستا، ضریب کاهش مقاومت (Rinter) در چارچوب معیار شکست موهر-کولمب، در معادلات لحاظ شد.

برای شبیه سازی رفتار مرزی بین مصالح مشابه یا مصالح متفاوت از یکدیگر و تعریف اندرکنش بین مصالح مدل رفتاری سطح مشترک بکار گرفته شده است. مدول سختی برشی نشان دهنده مقاومت المان سطح مشترک در برابر لغزش و تغییر شکل های برشی است. انتخاب این پارامتر برابر با مدول الاستیسیته مصالح اطراف، به منظور ساده سازی مدل و تضمین انتقال نیروهای برشی در سطح تماس صورت گرفته است. این فرض کمک می کند تا رفتار لغزشی به صورت الاستیک اولیه شبیه سازی شود و در صورت رسیدن به حد تسلیم، مدل غیرخطی سطح مشترک فعال گردد. این مدل مبتنی بر قانون اصطکاک کولمب (۱۷۸۵) میلادی بوده و از این فرض پیروی می کند که نیروی اصطکاک المان سطح مشترک بخشی از ضریب اصطکاک و نیروهای محصورکننده وابسته به جهت نرمال عمل کننده بر سطح مشترک است. المان های سطح مشترک برای جابه جایی نسبی در امتداد برشی و نرمال بکار گرفته می شود که رفتار صفحه - صفحه و خط - خط را شبیه سازی می کند. شکل ۵ المان سطح مشترک بین شمع ها در نرم افزار را نمایش می دهد. پارامترهای غیرخطی اصلی مدل سطح مشترک شامل مدول سختی نرمال و مدول سختی برشی می باشند. پارامتر مدول سختی نرمال همان پارامتر مدول الاستیسیته برای تعریف رفتار پیوند و عدم پیوند در جهت نرمال (عمود) بر المان های سطح مشترک است و پارامتر مدول سختی برشی مدول الاستیسیته برای رفتار لغزشی در جهت نرمال بر المان سطح مشترک می باشد.



شکل ۵: المان سطح مشترک بین شمع ها در نرم افزار MIDAS gts nx

Fig. 5. Interface element between piles in MIDAS GTS NX software

رفتار المان شمع را می توان به یک رفتار عادی و یک رفتار مماسی تقسیم کرد. رفتار نرمال بین شمع و زمین اطراف آن ثابت و صلب در نظر گرفته می شود، در حالی که رفتار مماسی یک رفتار الاستیک غیرخطی است. رفتار الاستیک غیرخطی به نیروی تسلیم و تابع تسلیم اختصاص داده شده تقسیم می شود. المان نوک شمع به عنوان سطح مشترک نقطه جامد عمل می کند که رفتار نسبی بین المان زمین و گره شمع را نشان می دهد. برای تعریف رفتار، مواد و ویژگی های یک المان شمع را می توان بر اساس داده های آزمایشی، مانند تست بار وارد کرد. برای محاسبه مدول سختی نرمال ابتدا با استفاده از نمودار



آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، نیروی نهایی گسیختگی شمع و جابجایی شمع استخراج گردید و سپس محاسبات مربوط به مدول سختی نرمال با استفاده از روابط شماره ۹ تا ۱۹ مربوط به نرم افزار MIDAS GTS NX بدست آورده شد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۳ برای هر لایه خاک به طور جداگانه آورده شده است.

$$v_{oww} = a_1 \times 10^{-1} + a_2 \times 10^{-2} + a_n \times 10^{-n} \quad (۱)$$

$$UltimateShearForce = \frac{p_u}{L_p \times t} \quad (۲)$$

$$K_n = \frac{E_{oedi}}{t_v} \quad (۳)$$

$$K_t = \frac{G_i}{t_v} \quad (۴)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} R \tan(\phi_{soil}) \quad (۵)$$

$$E_{oedi} = \frac{2G_i(1 - v_i)}{1 - 2Xv_i} \quad (۶)$$

$$G_i = RG_{soil} \quad (۷)$$

$$G_{soil} = \frac{E}{2(1 + v_{soil})} \quad (۸)$$

$$R_{inter} * (K_n u_n + K_t u_t \tan(\phi) - C) = 0 \quad (۹)$$

در این معادلات،  $u_t$  و  $u_n$  نشان دهنده جابجایی‌های نسبی عمودی و افقی بین سطوح مشترک هستند.  $A'$  مساحت سطح مشترک خاک-پی،  $t_v$  ضخامت مجازی سطح مشترک  $[0.1, 0.4 t_v]$ ، همانطور که توسط مانا و بردیا (۲۰۰۹) توصیه شده است،  $E_{oedi}$  مدول مقایسه سطح مشترک،  $G_{ur}$  مدول برشی متوسط باربرداری-بارگذاری مجدد، و  $K_t$  و  $K_n$  سختی سطح مشترک هستند. با استفاده از این معادلات، سختی سطح مشترک بین دو قسمت با استفاده از فنرهای خطی نرمال و برشی مدل سازی شد. مقاومت واقعی سطح مشترک به پارامترهایی مانند نوع ماده (خاک، بتن و غیره) و مساحت فونداسیون بستگی دارد. این مقدار معمولاً در محدوده بین ۰٫۱ تا ۱ است که در این پژوهش با توجه به نوع خاک مقدار آن ۱ در نظر گرفته شده است. [۱۵]

جدول ۳: محاسبات مربوط به مدول سختی شمع

Table 3. Calculations related to the pile stiffness modulus

| شماره لایه | $G_i$ (kn/m <sup>2</sup> ) | $E_{oedi}$ (kn/m <sup>2</sup> ) | $K_n$ (kn/m <sup>2</sup> ) |
|------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| لایه اول   | 6154                       | 21539                           | 21539                      |
| لایه دوم   | 17308                      | 60578                           | 60578                      |
| لایه سوم   | 35385                      | 123848                          | 123848                     |

### ۵-۳ آزمایش بارگذاری شمع و صحت سنجی

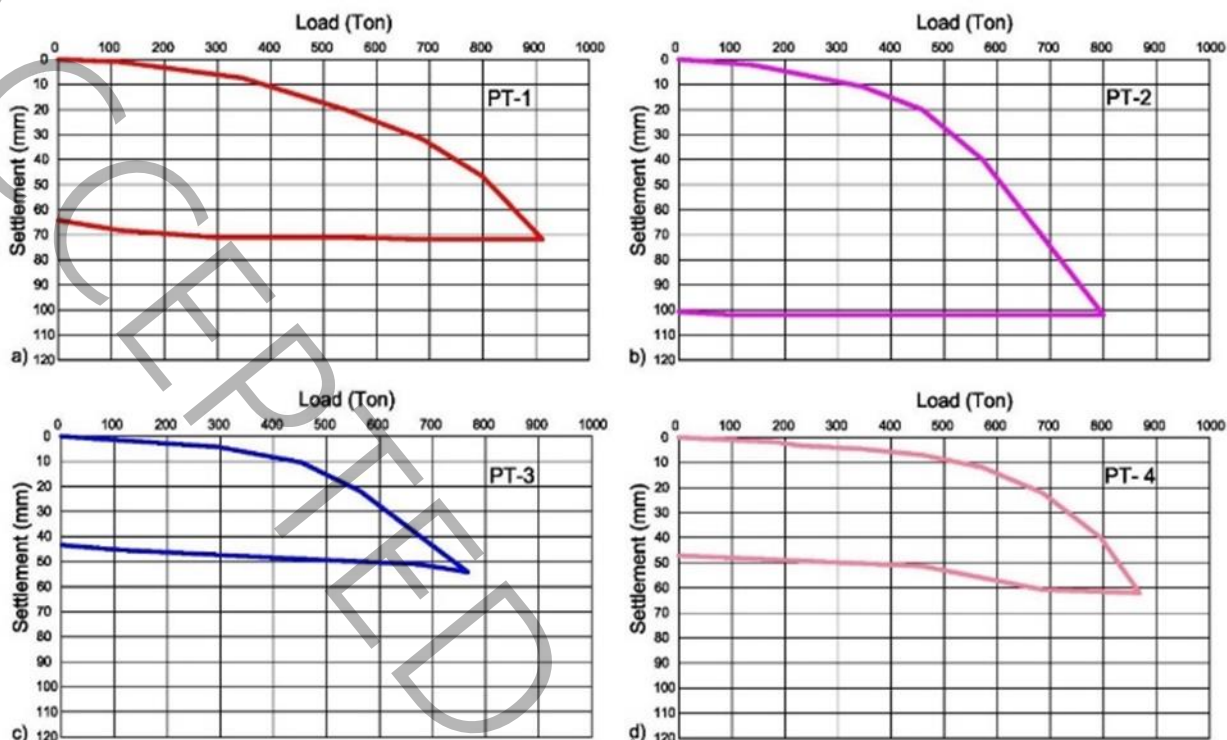
در سازه مورد بحث تعداد ۴ شمع مورد آزمایش قرار گرفت، که دو نمونه از آنها با نرم افزار MIDAS مورد صحت سنجی قرار گرفته است. بدین منظور جهت آزمایش نیروی مورد نیاز توسط یک جک هیدرولیکی به شمع اعمال شد. در طول آزمایش بارگذاری شمع میزان بار وارده به شمع و همچنین تغییر شکل سر شمع تحت بارهای وارده اندازه‌گیری شد. بار مورد نظر توسط جک هیدرولیکی به شمع وارد گردید، که این جک جهت اندازه‌گیری بار وارد شده مجهز به یک اندازه‌گیر عقربه‌ای متصل به خود می‌باشد. جهت بارگذاری استاتیکی از روش بارگذاری ارائه شده در مشخصات فنی و استاندارد ASTM استفاده شده است. شکل ۶ نشان دهنده اتصال اندازه‌گیر عقربه‌ای برای اندازه‌گیری تغییر مکان (نشست) شمع می‌باشد. اندازه‌گیرهای عقربه‌ای وظیفه ثبت نشست شمع مورد نظر تحت بارگذاری مرحله‌ای را دارند. که این بارگذاری از صفر تا حدود ۷۵۰ ton تا ۹۰۰ ton (با توجه به موقعیت هر شمع) لحاظ شد، و به تدریج پس از اعمال نیروی حداکثری مورد نظر روی هر شمع به تدریج کم شده است. در تمامی این فرایند نشست توسط اندازه‌گیر عقربه‌ای ثبت گردید، که این نتایج یعنی ظرفیت باربری (نمودار بار- تغییر مکان) مربوط به هر چهار شمع آزمایشی در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۶: اندازه‌گیر عقربه‌ای نشست شمع‌ها

Fig. 6. Dial gauge for pile settlement

Table 4. Results of interpretation of the bearing capacity of piles tested by static load testing



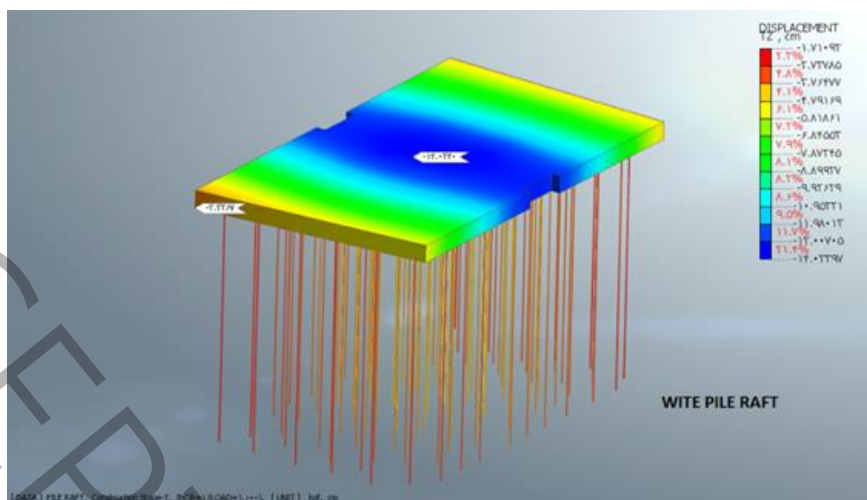
شکل ۷: نمودار بار تغییر مکان (نشست) چهار شمع

Fig. 7. Load-displacement (settlement) curve of four piles

روش های متفاوتی برای آزمایش بارگذاری شمع وجود دارد که برای تعیین منطقی ترین مقدار نیروی گسیختگی از روی نمودار بار نشست، توجه به مشخصات شمع، نوع خاک، روش انجام آزمایش، رفتار سیستم شمع-خاک در مقابل بار وارده، مقدار تغییر مکان، شیب خط تغییر مکان در پله های بارگذاری و همچنین مقدار تغییر شکل پلاستیک باقی مانده در سیستم خاک-شمع لازم می باشد. نتایج نمودار چهار آزمایش انجام گرفته با استفاده از روش های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. در انتخاب مقدار بار نهایی پیشنهادی، توجه بیشتری به مقدار برآورد شده با استفاده از روش دیویسون و روش باتلر و هوی شده است. برای تعیین بار مجاز روی شمع، ظرفیت شمع

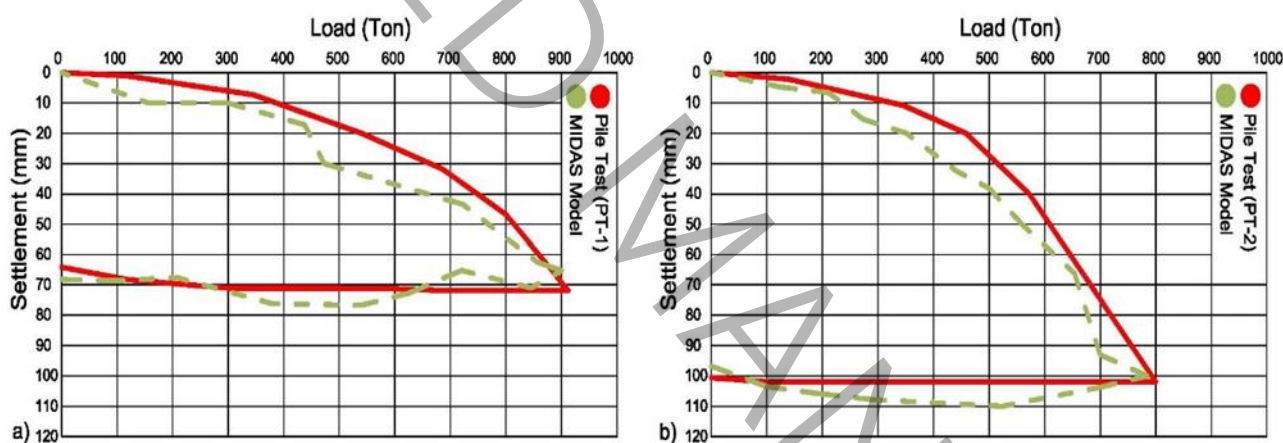
| Pile Name    | Pile Specifications |               |             |          |         |              |               | Proposed Ultimate load (Ton) | Corresponding Settlement(mm) | Alloawbale Capacity (Ton) SF=2.2 |
|--------------|---------------------|---------------|-------------|----------|---------|--------------|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|              | Length (m)          | Diameter (cm) | Butler &Hoy | 2 - Line | Davison | Chin-Kondner | Brinch-Hansen |                              |                              |                                  |
| PT – 1       | 25                  | 100           | 880         | 640      | 560     |              |               | 690                          | 36                           | 315                              |
| PT – 2       | 30                  | 100           | 760         | 500      | 520     |              |               | 640                          | 46                           | 290                              |
| PT – 3       | 25                  | 100           | 720         | 500      | 550     | 909          | 884           | 635                          | 31                           | 288                              |
| PT – 4       | 30                  | 100           | 820         | 700      | 680     | 1000         | 837           | 750                          | 32                           | 340                              |
| Average 25 m |                     |               | 800         | 545      | 555     | 909          | 884           | 662                          | -                            | 300                              |
| Average 30 m |                     |               | 790         | 590      | 580     | 1000         | 837           | 695                          | -                            | 315                              |

معمولا بر ضریب اطمینان تقسیم می شود. مقدار ضریب اطمینان به میزان پذیرش عوامل مربوط به گسیختگی و همچنین آگاهی و کنترل جنبه های موثر در تغییرات ظرفیت باربری در سایت بستگی دارد. در مواردی که آزمایش در شرایط نهایی انجام گرفته و شمع ها نیز مشابه شرایط عملکرد واقعی در پروژه اجرا میگردد، میتوان ضریب اطمینان را از ۲٫۵ به ۲٫۲ کاهش داد. که در این مطالعه مورد ذکر شده اعمال گردیده است. همچنین در جدول ۴ نشست متناظر با بار گسیختگی با مقدار ضریب اطمینان ۲٫۲، مقدار بار مجاز شمع تعیین شده بر اساس روش های مختلف قابل مشاهده است. در آزمایش بروی شمع PT-1 به طول ۲۵ m مقدار نشست در بار ۹۱۰ ton برابر ۷۰ mm بوده است و با باربرداری و رساندن با بار صفر مقدار نشست شمع حدود ۶۳ mm شده است. در آزمایش بروی شمع PT-2 به طول ۳۰ m مقدار نشست در بار ۷۹۶ ton برابر با ۱۰۰ mm بوده است و با بار برداری و رساندن به بار صفر مقدار نشست شمع حدود ۹۹ mm شده است. در آزمایش بر روی شمع PT-3 به طول ۲۵ m با افزایش بار و رساندن به بار ۷۶۵ ton به اندازه بیش از ۵۰ mm نشست کرده و با برداری و رساندن به بار صفر، مقدار نشست حدود ۴۲ mm شده است. در آزمایش بر روی شمع PT-4 به طول ۳۰ m مقدار نشست در بار ۸۶۳ ton برابر ۶۱ mm بوده است و با برداری و رساندن به بار صفر مقدار نشست شمع در حدود ۴۶ mm شده است. آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع ها قبل از اجرای پی و برای چهار شمع توسط شرکت مشاور انجام گردیده بود. سپس در این تحقیق برای صحت سنجی مدلسازی شمع و خاک اطراف آن، دو شمع از چهار شمع مورد آزمایش (شمع های PT-1 و PT-2) در نرم افزار MIDAS مدلسازی گردید و مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۸ مدل سازی شمع ها را نشان میدهد. برای اطمینان از صحت مدل در MIDAS چندین نقطه مطابق نمودار بار-تغییر مکان آزمایش شمع اعمال گردید که این نقاط نشان دهنده بار ورودی به شمع بود. سپس مقدار تغییر مکان متناظر با هر بار توسط مدل خروجی گرفته شد. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، نمودار بار تغییر مکان دو شمع PT-1 و PT-2 با دو شمع مدل شده توسط نرم افزار تطابق نسبتا خوبی (اختلاف کمتر از ۱۰ درصد) دارد. مقدار نشست محاسبه شده در نرم افزار برای شمع PT-1 با بارگذاری ۹۰۰ ton ، ۶۵ mm و برای شمع PT-2 با بارگذاری ۸۰۰ ton ، ۸۰۰ mm محاسبه شد. که این مقادیر نشان دهنده صحت مدل سازی است.



شکل ۸ : حداکثر و حداقل نشست پی با حضور شمع‌ها در نرم‌افزار MIDAS gts nx

Fig. 8. Maximum and minimum foundation settlement with the presence of piles in MIDAS GTS NX software



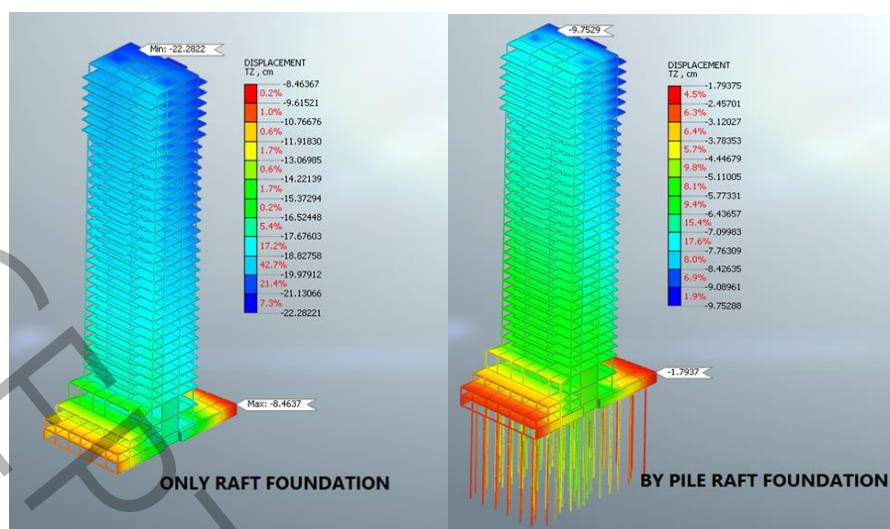
شکل ۹ : مقایسه نشست آزمایش بارگذاری استاتیکی و نشست در نرم‌افزار MIDAS

Fig. 9. Comparison of settlement from static load testing and settlement in MIDAS

## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- نشست طبقات

مطالعه صورت گرفته بر روی عملکرد لرزه‌ای ساختمان بلندمرتبه می‌باشد که با در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه، با سه لایه خاک و تعداد ۱۰۰ عدد شمع تحلیل و بررسی شد. شکل ۱۰ مدل سازی ساختمان مورد مطالعه را در دو حالت با حضور شمع‌ها و بدون حضور شمع‌ها پس از تحلیل در نرم‌افزار MIDAS را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نشست طبقات در حالت بدون حضور شمع و با حضور شمع ها در MIDAS gts nx

Fig. 10. Settlement of floors in the absence and presence of piles in MIDAS GTS NX

پس از تحلیل و بررسی مدل سازی انجام شده، مشخص شد در نظرگیری شمع ها در پی ساختمان باعث کاهش نشست طبقات و همچنین کاهش نشست پی می شود. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی در جدول ۵ ارائه شده است. به عنوان مثال حداکثر نشست پی با حضور شمع (حالت در نظر گیری SSI) ۱۴ cm و در حالت بدون حضور شمع به مقدار ۱۹ cm میرسد. همچنین حداقل نشست پی در دو حالت مذکور یعنی حالت با حضور شمع و بدون حضور شمع به ترتیب مقادیر ۳ cm و ۵ cm محاسبه گردید. با توجه به مقادیر بدست آمده مشخص شد که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه نشست طبقات و نشست پی به طور قابل توجهی کاهش میابد. در یک دید کلی می توان گفت که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه باعث می شود تا رفتار سازه به رفتار واقعی اش نزدیکتر شود. همچنین در جدول ۶ مقایسه ای بین دو مدل اندرکنش خاک-سازه و مدل فنر وینکلر قابل مشاهده است. نتایج دو مقایسه نشست پی در نرم افزار، نشان می دهد که در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه در تحلیل ها نتایج دقیق تر و به واقعیت نزدیکتر است.

جدول ۵: مقایسه نتایج نشست پی با حضور شمع ها و بدون حضور شمع ها در نرم افزار MIDAS gts nx (cm)

Table 5. Comparison of foundation settlement results with and without piles in MIDAS GTS NX software (cm)

| نشست پی (cm) | با حضور شمع ها (حالت SSI) | بدون حضور شمع ها (حالت Fixed Base) |
|--------------|---------------------------|------------------------------------|
| حداکثر       | ۱۴                        | ۱۹                                 |
| حداقل        | ۳                         | ۵                                  |

جدول ۶: مقایسه نتایج نشست پی در دو مدل اندرکنش خاک و سازه و مدل فنر وینکلر (cm)

Table 6. Comparison of foundation settlement results in two models: soil-structure interaction and Winkler spring model (cm)

| نشست پی (cm) | با حضور شمع ها (حالت SSI) | بدون حضور شمع ها (حالت Fixed Base) |
|--------------|---------------------------|------------------------------------|
| حداکثر       | ۱۴                        | ۱۰                                 |
| حداقل        | ۳                         | ۰/۸                                |

همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، با حضوری شمع مقدار این نشست بیشتر شده است، به طوری که در حالت حداکثر نشست با حضور شمع عدد ۱۴ cm و برای حالت بدون حضور شمع ۱۰ cm محاسبه گردید.

## ۶-۲ نشست خاک زیر پی

همانطور که عنوان شد فونداسیون ساختمان ۳۳ طبقه از نوع پی گسترده با ضخامت بالا می‌باشد. از سویی دیگر سازه آن نیز قاب خمشی به همراه دیوار برشی بتن آرمه می‌باشد که دارای سختی و صلبیت بالاست. در این صورت می‌توان مقادیر بزرگتری برای نشست‌های کل و تفاضلی مجاز در نظر گرفت.

هرچند مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ویرایش سال ۹۲ بند ۱-۴-۴ و ۷-۴-۲ و در جدول ۲-۴-۷ برای پی‌های گسترده بر روی خاک ماسه‌ای نشست مجاز کل ۵ cm و نشست تفاضلی ۲ cm را بعنوان مقادیر اولیه پیشنهاد کرده است، اما شایان ذکر است این مقادیر وقتی صحیح هستند که پی و سازه صلبیت چندانی ندارند. اگر صلبیت پی و سازه زیاد باشد مقادیر نشست‌های مجاز را می‌توان بیشتر در نظر گرفت. در ساختمان مورد بحث با توجه به وجود صلبیت بالای سازه و پی در طراحی فونداسیون نشست مجاز کل بصورت بسیار محافظه کارانه عدد ۱۰ cm و نشست تفاضلی مجاز نیز ۴ cm در نظر گرفته شده است. که این میزان نشست از مقدار مجاز آیین نامه مذکور عبور نکرده است.

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب نشست خاک زیر پی تحت بارهای لرزه‌ای در نرم افزار SAFE و نشست خاک زیر پی تحت بارهای ثقلی در نرم افزار MIDAS را نشان می‌دهد. در جدول ۷ مقایسه‌ای بین نشست تحت بار ثقلی و بار لرزه‌ای انجام شد. همانطور که مشخص است مقدار نشست تحت بارهای لرزه‌ای بیشتر از بار ثقلی می‌باشد. به عنوان مثال در حالت لرزه‌ای با نرم افزار MIDAS مقدار نشست حداکثر ۷/۸ cm می‌باشد، در صورتی که مقدار این نشست برای بار ثقلی ۶/۵ cm محاسبه شده است. هرچند میزان این اختلاف ناچیز است، اما با تغییر جنس خاک احتمال افزایش این اختلاف بیشتر می‌گردد.

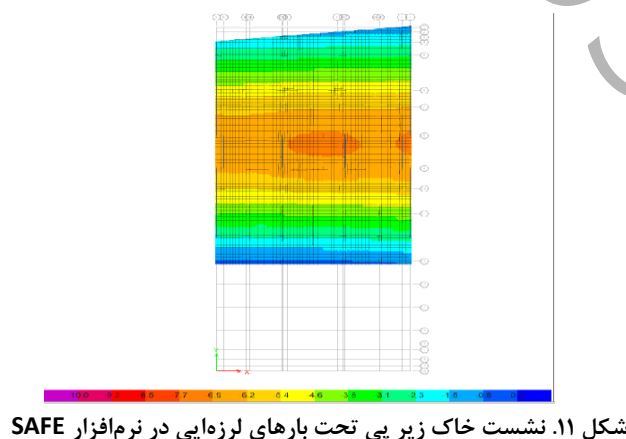
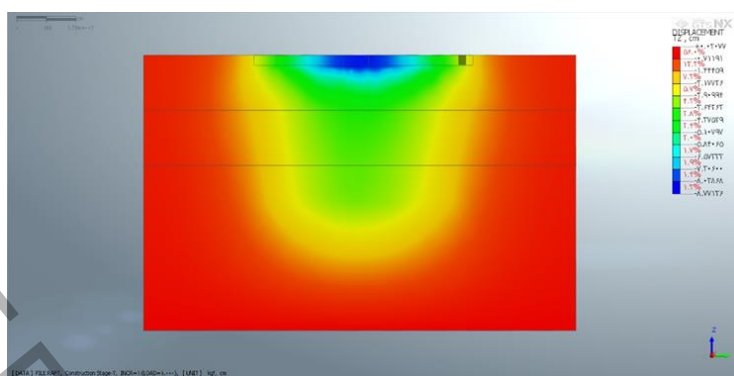


Fig. 11. Soil settlement beneath the foundation under seismic loads in SAFE software





شکل ۱۲. نشست لایه‌های خاک زیر پی تحت بارهای ثقلی در نرم‌افزار MIDAS GTS NX

Fig. 12. Settlement of soil layers beneath the foundation under vertical loads in MIDAS GTS NX software

جدول ۷: مقایسه نتایج نشست خاک زیر پی در دو مدل اندرکنش خاک و سازه و مدل فنر وینکلر

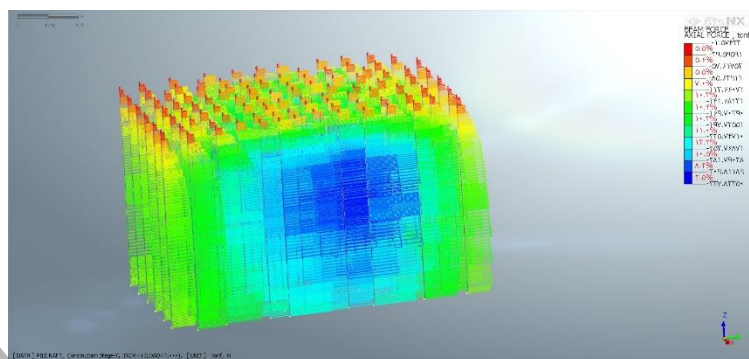
Table 7. Comparison of soil settlement results beneath the foundation in two models: soil-structure interaction model and Winkler spring model

|              | بار لرزه ای |          | بار ثقلی |          |
|--------------|-------------|----------|----------|----------|
|              | Max (cm)    | Min (cm) | Max (cm) | Min (cm) |
| SAFE         | ۷/۱         | ۳/۵      | ۵/۹      | ۲/۳      |
| MIDAS GTS NX | ۷/۸         | ۳/۹      | ۶/۵      | ۲/۷      |

### ۳-۶- نیروی شمع‌ها

در تحقیق حاضر به محاسبه نیروی شمع‌ها در دو حالت پایه ثابت و حالت اندرکنش خاک-سازه نیز پرداخته شده است. شکل ۱۳ نمایی از نرم افزار که حاوی اطلاعات نیروی شمع‌ها با لحاظ اثرات خاک می‌باشد را نشان می‌دهد. نیروی شمع‌ها تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای در مدل فنر وینکلر (حالت پایه ثابت) بیشتر از مدل اندرکنشی شده است. جدول ۸ و جدول ۹ مقادیر نیروی شمع‌ها را در دو حالت ثقلی و لرزه‌ای نشان می‌دهد. به عنوان مثال نیروی حداکثر شمع در حالت لرزه‌ای و در حالت بدون لحاظ اندرکنش (محاسبه شده با نرم افزار SAFE) ۴۳۰ ton و همین پارامتر با لحاظ اندرکنش خاک - سازه (محاسبه شده با نرم افزار MIDAS) ۳۹۴ ton محاسبه گردید. که این مسئله اهمیت لحاظ کردن اثرات خاک در محاسبات را نشان داده است. از طرف دیگر نیروی حداکثر شمع در حالت ثقلی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه ۳۳۷ ton و بدون در نظرگیری اثرات خاک ۴۰۰ ton محاسبه گردید. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد نیروی شمع‌ها با لحاظ اثرات خاک در تحلیل‌ها برای بارهای لرزه‌ای حدود ۱۰ درصد کمتر از حالت پایه ثابت می‌باشد. و در بارهای ثقلی میزان این اختلاف به حدود ۲۰ درصد میرسد. بنابراین با لحاظ اثرات خاک نتایج منطبق با واقعیت در تحلیل سازه‌های بلند میسر خواهد گردید.





شکل ۱۳. نمایش کانتور نیروی شمع‌ها در نرم‌افزار MIDAS GTS NX

Fig. 13. Display of pile force contours in MIDAS GTS NX software

جدول ۸. مقایسه نیروی شمع‌ها تحت بار لرزه‌ای در نرم‌افزار MIDAS & SAFE

Table 8. Comparison of pile forces under seismic loads in MIDAS and SAFE software

|              | نیروی شمع‌ها تحت بار لرزه‌ای (ton) |       |
|--------------|------------------------------------|-------|
|              | حداکثر                             | حداقل |
| MIDAS GTS NX | ۳۹۴                                | ۱/۹   |
| SAFE         | ۴۳۰                                | ۲/۲   |

جدول ۹. مقایسه نیروی شمع‌ها تحت بار ثقلی در نرم‌افزار MIDAS & SAFE

Table 9. Comparison of pile forces under vertical loads in MIDAS and SAFE software

|              | نیروی شمع‌ها تحت بار ثقلی (ton) |       |
|--------------|---------------------------------|-------|
|              | حداکثر                          | حداقل |
| MIDAS GTS NX | ۳۳۷                             | ۲۹    |
| SAFE         | ۴۰۰                             | ۷۴    |

#### ۴-۶- ثبت حرکات زمین و اندازه‌گیری شدت

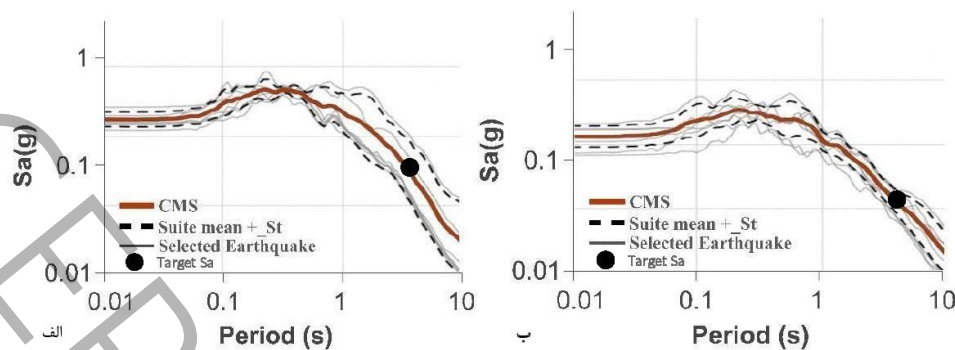
جهت ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه در دو حالت پایه ثابت و حالت اندرکنش خاک - سازه تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شد. برای این منظور، هشت رکورد حرکت زمین بر اساس طیف پاسخ مناسب مقیاس‌بندی شدند. بزرگی زلزله بین ۵/۵ تا ۷/۵ بود و بسته به موقعیت سازه، به رکوردهای میدان دور در خاک نوع III محدود شد. میانگین طیف پاسخ الاستیک از رکوردهای حرکت زمین تقریباً با طیف پاسخ یکسان بود. با توجه به نوع خاک (نوع III) و حداقل مدت زمان حرکت زلزله قوی (D5-D95)، ۱۰ تا ۳۰ ثانیه در نظر گرفته

شد. همچنین، سرعت موج برشی Vs بین ۱۷۵ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه لحظ گردید. دو سطح خطر زلزله، ۵۰ و احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال، در نظر گرفته شد که منجر به دوره بازگشت متوسط ۷۲ و ۴۷۵ سال شد. EDP در نظر گرفته شده در این تحقیق، حداکثر جابجایی نسبی بین طبقات بود. جدول ۱۰ تاریخچه زمانی شتابنگاشت‌های انتخاب شده را برای هر دو حالت دوره بازگشت نشان می‌دهد. جدول ۱۰ تاریخچه زمانی شتاب نگاشت‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۴ حرکات زمین انتخاب شده و مقیاس شده را برای دو دوره بازگشت ۷۲ و ۴۷۵ سال قابل مشاهده است.

جدول ۱۰. تاریخچه زمانی شتاب زلزله افقی منتخب از پایگاه داده حرکات زمین PEER

Table 10. Time history of selected horizontal earthquake acceleration from the PEER ground motion database

| Return Period | No | Earthquake         | Year | NGA record | Scale factor Based on CMS | M    | R (KM) | Mechanism   | PGA (g) | PGV (m/s) | Frequency (Hz) |
|---------------|----|--------------------|------|------------|---------------------------|------|--------|-------------|---------|-----------|----------------|
| 72            | 1  | Superstition       | 1987 | 718        | 1.31                      | 6.22 | 17.5   | Strike slip | 0.15    | 0.17      | 7.69           |
|               | 2  | Hector Mine        | 1999 | 1,776      | 2.05                      | 7.13 | 56.4   | Strike slip | 0.14    | 0.15      | 3.34           |
|               | 3  | Hector Mine        | 1999 | 1,836      | 3.39                      | 7.13 | 42     | Strike slip | 0.22    | 0.24      | 6.93           |
|               | 4  | San Fernando       | 1971 | 68         | 0.69                      | 6.61 | 22.7   | Reverse     | 0.16    | 0.15      | 5.40           |
|               | 5  | Duzce Turkey       | 1999 | 1,613      | 1.87                      | 7.14 | 25.7   | Strike slip | 0.1     | 0.11      | 5.74           |
|               | 6  | Chalfant Valley    | 1986 | 549        | 1.03                      | 6.19 | 16.3   | Strike slip | 0.26    | 0.22      | 3.94           |
|               | 7  | chi-chi Taiwan     | 1999 | 1,476      | 1.93                      | 7.62 | 28.4   | Reverse     | 0.3     | 0.29      | 4.72           |
|               | 8  | Landers            | 1992 | 850        | 1.75                      | 7.28 | 21.8   | Strike slip | 0.3     | 0.34      | 5.47           |
| 475           | 1  | Kobe Japan         | 1995 | 1,100      | 2.08                      | 6.9  | 24.8   | Strike slip | 0.46    | 0.44      | 2.56           |
|               | 2  | Chi- Chi Taiwan    | 1999 | 2,746      | 3.31                      | 6.2  | 33     | Strike slip | 0.17    | 0.37      | 4.2            |
|               | 3  | Hector Mine        | 1999 | 1,762      | 1.62                      | 7.13 | 41.8   | Reverse     | 0.29    | 0.45      | 7.83           |
|               | 4  | Chi-Chi Taiwan     | 1999 | 2,746      | 3.31                      | 6.2  | 33     | Strike slip | 0.17    | 0.36      | 4.21           |
|               | 5  | Denali Alaska      | 2002 | 2,113      | 2.37                      | 7.9  | 53     | Strike slip | 0.13    | 0.27      | 12.21          |
|               | 6  | Kobe Japan         | 1995 | 1,121      | 3.08                      | 6.9  | 27.7   | Strike slip | 0.49    | 0.44      | 2.25           |
|               | 7  | Chi- Chi Taiwan    | 1999 | 2,639      | 3.31                      | 6.2  | 37     | Reverse     | 0.33    | 0.29      | 2.73           |
|               | 8  | Superstition Hills | 1987 | 729        | 1.31                      | 6.54 | 23.8   | Strike slip | 0.23    | 0.29      | 7.83           |

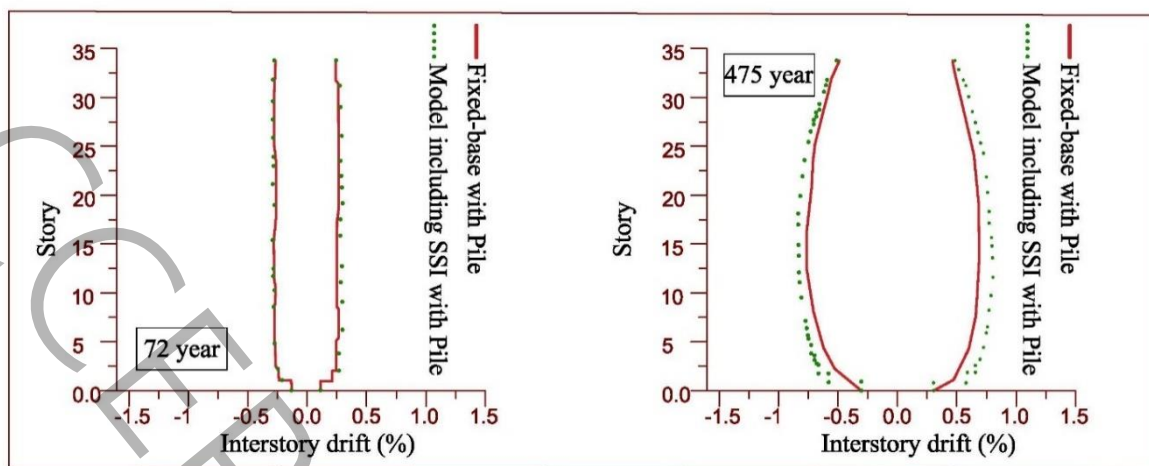


شکل ۱۴: حرکات زمین انتخاب شده و مقیاس شده را برای دو دوره بازگشت (الف) ۴۷۵ سال و (ب) ۷۲ سال

Fig. 14. Selected and scaled ground motions for two return periods: a) 475 years and b) 72 years

#### ۵-۶- اجزای تقاضای مهندسی

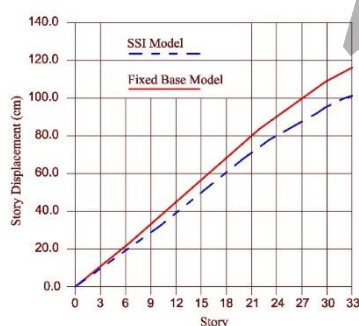
برای مدل سازه مورد مطالعه و حرکت زمین انتخاب شده، EDPها برای تعیین کمیت تفاوت‌های احتمالی ارزیابی شدند. شکل ۱۵ مقادیر میانگین محاسبه شده حداکثر جابجایی‌های بین طبقه‌ای را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها مقادیر میانگین محاسبه شده ۸ زلزله را برای هر سطح خطر، یعنی دوره‌های بازگشت ۷۲ و ۴۷۵ ساله، نشان می‌دهند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، میانگین جابجایی‌های بین طبقه‌ای در حالت پایه ثابت و حالت SSI برای دوره بازگشت ۷۲ سال اختلاف ناچیزی دارند. بنابراین، طبق محاسبات انجام شده در این مطالعه، می‌توان اثرات خاک را بر میانگین جابجایی بین طبقات نادیده گرفت. از سوی دیگر، مقایسه ذکر شده برای دوره بازگشت ۴۷۵ ساله، به ویژه در طبقات پایین سازه، متفاوت است. به طوری که، در مورد حالت پایه ثابت، میانگین حداکثر جابجایی بین طبقه‌ای ۰٫۶۵٪ (در طبقات ۱۵ تا ۱۸) است. این میزان در حالت SSI در طبقات ۱۲ و ۱۳ به ۰٫۷۵٪ می‌رسد. در زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال یا بیشتر، چنین تفاوت‌هایی حداکثر رانش بین طبقه‌ای را افزایش می‌دهند. بنابراین، عدم در نظر گرفتن SSI می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی در تحلیل شود. در مورد برش پایه، طبق FEMA P-2091، ساختمان‌های بلند مرتبه در منطقه لرزه‌خیز به دلیل اندرکنش خاک و سازه (SSI) دارای پاسخ طیفی در نظر گرفته می‌شوند که باعث تغییر دوره تناوب می‌شود، به این معنی که دوره تناوب را افزایش می‌دهد. بنابراین، کاهش برش پایه رخ می‌دهد. در این مطالعه، برش پایه در حالت پایه ثابت ۱۷۱۳ ton و در حالت لحاظ اندرکنش خاک - سازه ۱۵۴۸ ton محاسبه شد.



شکل ۱۵. EDP های لرزه‌ای محاسبه شده در امتداد ارتفاع برای هر سطح خطر: حداکثر جابجایی‌های بین طبقه‌ای

Fig. 15. Seismic EDPs calculated along the height for each hazard level: maximum inter-story drifts

شکل ۱۶ جابجایی طبقه را در دو حالت پایه ثابت و SSI نشان می‌دهد. اختلاف جابجایی برای این دو حالت، در طبقات پایین کم است و به تدریج در طبقات بالا افزایش می‌یابد. مطابق شکل میزان این اختلاف جابجایی تا طبقه چهارم ناچیز می‌باشد. و با افزایش ارتفاع میزان اختلاف بیشتر به چشم می‌خورد. بیشترین اختلاف در طبقه آخر قابل مشاهده است. جابجایی در طبقه ۳۳ در حالت پایه ثابت حدود ۱۱۸ cm است، در حالی که جابجایی در همان طبقه برای حالت SSI حدود ۱۰۰ cm محاسبه گردیده است. این موضوع نشان می‌دهد که با لحاظ اثرات خاک در تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، میزان جابجایی سازه به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۶. مقایسه جابجایی‌ها بین دو مدل

Fig. 16. Comparison of displacements between two models

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، میزان نشست پی یک ساختمان بلندمرتبه بتنی با سیستم قاب هسته‌ای، در دو حالت لحاظ اندرکنش خاک-سازه و پایه ثابت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا مدل سازی ساختمان ۳۳ طبقه بتنی و خاک اطراف پی در نرم افزار MIDAS، که یک نرم افزار مبتنی بر محیط پیوسته است، انجام شد. سپس مدل ساختمان در دو حالت اندرکنش خاک-سازه (SSI) و پایه ثابت (Fixed Base) تحلیل و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید.

نتایج حاصل از تحلیل ها نشان داد که میزان نشست پی در حضور شمع ها و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، نسبت به حالت پایه ثابت تفاوت قابل توجهی دارد؛ به طوری که برای ساختمان مورد تحقیق مقدار نشست حداکثر در حالت SSI برابر با ۱۴ cm و در حالت Fixed Base معادل ۱۹ cm به دست آمد. همچنین، مقدار نشست حداقل در حالت SSI برابر با ۳ cm و در حالت Fixed Base برابر با ۵ cm محاسبه گردید. این اختلافات بیانگر اهمیت لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه در تحلیل ساختمان های بلندمرتبه است، چرا که منجر به نتایج دقیق تر و نزدیک تر به واقعیت می شود.

همچنین جهت بررسی رفتار لرزه ای سازه تحت دو حالت پایه ثابت و حالت SSI، تحلیل دینامیکی غیر خطی انجام شد. دو گروه زلزله با دوره های بازگشت ۷۲ سال و ۴۷۵ سال به سازه اعمال شد. نتایج نشان داد حداکثر جابجایی بین طبقه ای در زلزله های با دور بازگشت ۷۲ سال برای هر دو حالت پایه ثابت و حالت SSI تفاوت چندانی ندارد. اما این مسئله برای زلزله های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال باهم متفاوت است و با لحاظ اثرات خاک در تحلیل ها میزان این جابجایی افزایش می یابد. همچنین میزان جابجایی کلی ساختمان برای هر دو حالت متفاوت بود. به طوری که میزان جابجایی سازه در حالت SSI کمتر از حالت پایه ثابت بدست آمد. این اختلاف با افزایش ارتفاع ساختمان بیشتر بود و بیشترین اختلاف به میزان ۲۰ درصد در طبقه ۳۳ مشاهده شد.

به طور کلی، یافته های این تحقیق نشان می دهد که در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، تأثیر قابل ملاحظه ای بر میزان نشست پی ساختمان دارد و نتایج حاصل از تحلیل پایه ثابت ممکن است منجر به برآوردهای غیرواقعی گردد. همچنین اثرات خاک تأثیرگذار در پاسخ رفتار سازه هنگام زلزله بخصوص زلزله های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال دارد. همچنین با توجه به نوع سازه (سیستم قاب هسته ای) و نوع خاک مورد بررسی، پیشنهاد می شود مطالعات مشابه برای سایر سیستم های سازه ای و انواع خاک نیز انجام گیرد تا امکان مقایسه جامع تر و ارائه راهکارهای بهینه تر فراهم شود.

## ۸- منابع و مراجع

- [1] Basics of Soil and Structure Measurement - Author: Dr. Ali Ghanbari (Professor of Khwarazmi University - (Shima Al-Sadat Hosseini) (in Persian)
- [2] Shakib, H., and G. R. Atefatdoost. "Effect of soil-structure interaction on torsional response of asymmetric wall type systems." *Procedia Engineering* 14 (2011): 1729-1736.
- [3] Eser, M., C. Aydemir, and I. Ekiz. "Effects of soil structure interaction on strength reduction factors." *Procedia Engineering* 14 (2011): 1696-1704.
- [4] Lou, Menglin, Huaifeng Wang, Xi Chen, and Yongmei Zhai. "Structure-soil-structure interaction: Literature review." *Soil dynamics and earthquake engineering* 31, no. 12 (2011): 1724-1731.

- [5] Whitman, Robert V., and F. E. Richart Jr. "Design procedures for dynamically loaded foundations." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93, no. 6 (1967): 169-193.
- [6]. Arboleda-Monsalve, L. G., J. A. Mercado, and K. R. Mackie. "Bidirectional ground motion effects in tall buildings using 3D soil-structure interaction models." In *17th World Conference on Earthquake Engineering*, 17WCEE, Sendai, Japan. 2020.
- [7]. Tahghighi, Hossein, and Ali Mohammadi. "Numerical evaluation of soil–structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings." *International Journal of Geomechanics* 20, no. 6 (2020): 04020072.
- [8]. Mercado, Jaime. "Seismic Soil-Structure Interaction Effects in Tall Buildings Considering Nonlinear-Inelastic Behaviors." (2021).
- [9] Wei, Luyao. "Research on Settlement Prediction of Building Foundation in Smart City Based on BP Network." *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 14, no. 6 (2023).
- [10] Dorrinia, Nima, Hossein Pahlavan, Mohammad Shamekhi Amiri, and Mojtaba Sirjani. "Seismic Assessment of RC Tall Core-Frame Buildings Considering Soil Structure Interaction (SSI)." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* (2025): 1-20.
- [11] Ter-Martirosyan, Armen Z., Alexander N. Shebunyaev, and Evgeny S. Sobolev. "Settlement of a foundation on an unsaturated sandy base taking vibrocreep into account." *Axioms* 12, no. 6 (2023): 594.
- [12] Li, Hongjiang. "Structural assessment of concrete cable-stayed bridge after replacement of closure segment: The service stage." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 25, no. 3 (2020): 04020023.
- [13] Rizzitano, Samuela, Ernesto Cascone, and Giovanni Biondi. "Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67 (2014): 66-84.
- [14] Rayhani, M. H., and M. Hesham El Naggar. "Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil." *International Journal of Geomechanics* 8, no. 6 (2008): 336-346.
- [15] Manna, B., and D. K. Baidya. "Vertical vibration of full-scale pile—analytical and experimental study." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 135, no. 10 (2009): 1452-1461.

### **Evaluation of Settlement and Seismic Response of High-Rise Buildings Considering Soil–Structure Interaction Based on Static Loading Results and Continuum Modeling**

**Mozhgan Soleimani <sup>1</sup>, Hossein Pahlavan <sup>\*2</sup>, Mohammad Shamkhi Amiri <sup>3</sup> Nima Dorrinia <sup>4</sup>**

<sup>1</sup> MSc .student in Structures, Shahrood University of Technology

<sup>2</sup> Assistant Professor of Structure and Earthquake Department, Shahrood University of Technology

<sup>3</sup> Assistant Professor of Structure and Earthquake Department, Shahrood University of Technology

<sup>4</sup> Ph.D Student of Structures, Shahrood University of Technology

## **ABSTRACT**

High-rise buildings have always been important subjects for researchers and structural designers. While seismic analysis of these structures is critical in engineering, the effects of soil-structure interaction often receive less attention. However, considering soil-structure interaction in seismic analyses provides more accurate and realistic estimates of structural performance during earthquakes. This study investigates the impact of soil-structure interaction on the seismic behavior of high-rise buildings with mat and pile (deep) foundations. The main goal is to evaluate foundation settlement considering soil-structure interaction and compare it with the fixed-base condition, which ignores soil effects. A 33-story high-rise building with a core frame structural system was modeled, analyzed, and designed using ETABS software. For a more precise analysis of the soil-structure-pile-mat interaction, the continuum soil modeling software MIDAS GTS NX was used to calculate foundation settlement under continuum conditions. Comparing these results with those using the Winkler spring model in non-continuum software shows that foundation settlement considering soil-structure interaction is greater than that predicted by the Winkler model. Furthermore, accounting for soil effects reduces foundation settlement compared to the fixed-base condition. Additionally, including soil effects in seismic analysis increases inter-story displacement. These findings emphasize the critical importance of incorporating soil-structure interaction in the analysis and design of high-rise buildings.

Keywords: seismic interaction of pile soil and structure, seismic performance of buildings, continuous environment modeling, finite element, tall structure



ACCEPTED MANUSCRIPT