

عملکرد رفتاری پی‌های عمیق بالشتکی بتن مسلح در خاک‌های لایه‌ای و رسی تحت بارگذاری دینامیکی

مقاله علمی - پژوهشی

*سید یعقوب ذوالفقاری فر (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

فرناز رنجبران، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

محمد نگارچی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sy.zolfegharifar@iaau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه

چکیده

در ساخت پل، ابنیه و سازه‌ها در عملیاتهای راهسازی و ساختمان سازی بر روی لایه‌های ضعیف خاک، مشکلاتی نظیر تغییر شکل خاک و ناپایداری عمومی پی ممکن است رخ دهد. به‌ویژه زمانی که از پی‌های طبیعی استفاده شود. یکی از راهکارهای مؤثر برای رفع این مشکلات، استفاده از پی مرکب شمع بالشتکی صلب است که بارهای سازه را به لایه‌های عمیق‌تر منتقل می‌کند و ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی تأثیر تغییرات شتاب اوج زمین و فرکانس موج بر لنگر خمشی شمع بالشتکی است. تأثیر تغییرات این پارامترها بر بیشینه لنگر خمشی شمع‌ها تحلیل شده و فرکانسی که در آن بیشترین لنگر خمشی رخ می‌دهد، تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌های رس نرم تأثیر قابل توجهی در گسترش و شدت آسیب‌های لرزه‌ای شمع‌ها دارند. بیشترین آسیب‌ها در مدل‌هایی با ضخامت بیشتر لایه رس، به‌ویژه مدل III، مشاهده شده است. همچنین، شتاب اوج زمین به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در گسترش آسیب‌ها شناسایی شد؛ به‌طوری که در شتاب $0.25g$ آسیب‌ها محدود، اما در $0.75g$ گسترده و شدید بودند. افزایش قطر شمع‌ها از 0.10 متر به 1 متر منجر به کاهش آسیب‌ها شد. علاوه بر این، شمع‌های تکی آسیب بیشتری نسبت به گروه شمع‌ها متحمل شدند. توزیع آسیب‌ها عمدتاً در نقاط اتصال لایه‌های ماسه و رس متمرکز بود. این پژوهش بر اهمیت مدل‌سازی دقیق خاک و بیکربندی مناسب شمع‌های مرکب بالشتکی برای طراحی مقاوم لرزه‌ای تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پی مرکب بالشتکی، خاک رسی، ABAQUS، بارگذاری دینامیکی، عملکرد رفتاری.

۱- مقدمه

سنگ‌بستر الزامی می‌شود (سان و همکاران، ۲۰۱۹). شمع‌ها عمدتاً در ساخت سازه‌های سنگین مانند برج‌ها، پل‌ها و تأسیسات صنعتی بزرگ کاربرد دارند که نیاز به تکیه بر زمین‌های پایدار دارند. در مناطق زلزله‌خیز، بررسی رفتار لرزه‌ای شمع‌ها، به ویژه در خاک‌های ماسه‌ای و اشباع، به یکی از موضوعات کلیدی تبدیل شده است. در چنین شرایطی، خاک تحت بارهای دینامیکی ممکن است با افزایش فشار آب منفذی مواجه شود که منجر به کاهش مقاومت و سختی می‌گردد. این پدیده، معروف

مهندسی ژئوتکنیک، پی‌های عمیق نقش حیاتی در تضمین پایداری سازه‌های سنگین ایفا می‌کنند، به ویژه در محیط‌هایی که لایه‌های سطحی خاک فاقد ظرفیت باربری کافی برای پی‌های کم‌عمق هستند. شمع‌ها به عنوان یکی از رایج‌ترین انواع پی‌های عمیق، بارهای سازه را به لایه‌های عمیق‌تر و مستحکم‌تر منتقل می‌کنند. این رویکرد به خصوص در مناطقی با خاک سطحی ضعیف یا تراکم‌پذیر ضروری است، زیرا لایه‌های فوقانی قادر به تحمل بارهای سازه نیستند و انتقال بار به لایه‌های مقاوم‌تر یا

بهسازی پی خاک ماسه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (لانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳). ترادیگو و همکاران (۲۰۱۵) با مدل‌سازی عددی مبتنی بر روش المان محدود، برهم‌کنش میان شمع و خاک در پی‌های مرکب را بررسی کردند. یوه و همکاران (۲۰۲۱) سیستم پی مرکب با تیر کلاهک و شمع صلب را برای تقویت خاک ماسه‌ای معرفی کردند که باعث کاهش جابجایی جانبی، نشست کلی و بهبود عملکرد نشست نامتقارن می‌شود. فو و لی (۲۰۲۱) رفتار انتقال بار عمودی در شالوده‌های مرکب شمع صلب و تأثیر حفاری مجاور را از طریق آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ مطالعه کردند و روند تغییر نیروی محوری، نیروی اصطکاکی شمع و نسبت تنش خاک را با عمق بررسی کردند. در پروژه‌هایی مانند پل‌های رودخانه‌ای یا دریایی که لایه‌های خاک ماسه‌ای ضخیم هستند و دسترسی به لایه‌های برابر دشوار است، پژوهشگران روش افزایش ضخامت لایه بالشتک در پی‌های مرکب شمع صلب را پیشنهاد کرده‌اند که علاوه بر تقویت لایه‌های ماسه‌ای عمیق، هزینه‌های اقتصادی را کاهش می‌دهد (شیاو و وانگ، ۲۰۲۳).

بسیاری از پژوهش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر روش المان محدود، نقش لایه بالشتک در بهسازی شالوده‌های مرکب شمع CFG را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که لایه بالشتک غلظت تنش را در بالای شمع کاهش داده، بخشی از بار را به خاک میان شمع‌ها منتقل کرده و شمع و خاک را در تحمل بار مشترک به کار می‌گیرد، که در نهایت باعث کاهش نشست پی می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۲؛ آی و همکاران، ۲۰۲۰). نرم‌افزارهای تخصصی شبیه‌سازی به مهندسان کمک می‌کنند تا رفتار شمع‌ها را در شرایط مختلف بررسی کرده و بهترین روش‌ها را برای طراحی پی‌های پایدارتر انتخاب کنند. یکی از اهداف کلیدی این مدل‌ها، پیش‌بینی رفتار شمع‌ها در شرایط روانگرایی و کاهش مقاومت خاک است که می‌تواند از آسیب‌های ناشی از زلزله جلوگیری کند. شبیه‌سازی دقیق اندرکنش میان شمع و خاک به مهندسان امکان می‌دهد تا رفتار شمع‌ها را در خاک‌های ماسه‌ای و اشباع تحلیل کرده و طراحی بهینه‌ای برای سازه‌های اجرا شده در مناطق زلزله‌خیز ارائه دهند.

با توسعه سریع شهرنشینی و رشد صنایع، نیاز به احداث سازه‌های مرتفع افزایش یافته است. این سازه‌ها به زیرساخت‌های مستحکم نیاز دارند که بارهای سنگین و نیروهای جانبی مانند

به روانگرایی، می‌تواند نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی بزرگی در شمع‌ها ایجاد کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). افزایش فشار آب منفذی ناشی از لرزش‌های زمین، مقاومت برشی خاک را کاهش داده و عملکرد شمع‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

هنگامی که لایه‌های مقاوم‌تر در اعماق زیاد قرار دارند، شمع‌ها بارهای سازه را به تدریج به این لایه‌ها منتقل می‌کنند. بر اساس عوامل مانند نوع بارگذاری، ویژگی‌های خاک و ابعاد سازه، شمع‌ها به صورت منفرد یا گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گروه شمع‌ها، چندین شمع به صورت منظم کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا بارهای سنگین‌تر را به طور یکنواخت توزیع کنند. در این حالت، اندرکنش میان شمع‌ها و خاک اطراف نقش مهمی در عملکرد آن‌ها دارد. عواملی مانند فاصله بین شمع‌ها، موقعیت سازه نسبت به بستر و ویژگی‌های اندرکنش شمع و خاک، تأثیر زیادی بر طراحی و عملکرد گروه شمع‌ها می‌گذارند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). در سال‌های اخیر، مدل‌های تحلیلی و عددی متعددی برای بررسی رفتار دینامیکی شمع‌ها در انواع خاک‌ها توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها عمدتاً رفتار شمع و خاک را تحت بارهای لرزه‌ای شبیه‌سازی می‌کنند. برای مثال، مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که پارامترهایی مانند شتاب اوج زلزله، نوع خاک و نحوه طراحی سازه مستقیماً بر رفتار شمع در برابر بارهای لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند. این پارامترها به شمع‌ها کمک می‌کنند تا در برابر تغییرات ناگهانی ناشی از لرزش زمین پایداری بیشتری داشته باشند. علاوه بر این، نوع خاکی که شمع در آن قرار می‌گیرد اهمیت دارد؛ خاک‌های ماسه‌ای و اشباع شده رفتار دینامیکی متفاوتی نسبت به خاک‌های سخت‌تر دارند. در این شرایط، نرم‌افزارهای تحلیل ژئوتکنیکی امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار شمع و خاک را فراهم کرده و بررسی اثرات پارامترهای لرزه‌ای را تسهیل می‌کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). در ساخت سازه‌ها روی لایه‌های ضعیف خاک، مشکلاتی مانند تغییر شکل خاک و ناپایداری پی ممکن است رخ دهد، به ویژه زمانی که از پی طبیعی استفاده شود. برای رفع این نیازها، تقویت لایه‌های ضعیف خاک ضروری است. یکی از راهکارهای مؤثر، استفاده از پی مرکب شمع صلب است که با بدنه سخت و اتصال قوی میان ذرات، بارهای سازه را به لایه‌های عمیق‌تر منتقل می‌کند. در مقایسه با شمع‌های انعطاف‌پذیر، این روش توانایی بیشتری در افزایش ظرفیت باربری پی دارد و به طور گسترده در

بر اساس اصطکاک جانبی و مقاومت انتهایی انجام می‌گیرد. پی‌های شمعی نشست کلی سازه‌ها را در خاک‌های ماسه‌ای کاهش می‌دهند (هانسو، ۱۹۸۴). در مناطق زلزله‌خیز، این پی‌ها تحت بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند و طراحی مناسب برای جلوگیری از شکست ضروری است (هوریکوشی و راندولف، ۱۹۹۶). پی‌ها به دو دسته کم‌عمق و عمیق تقسیم می‌شوند. پی‌های کم‌عمق زمانی استفاده می‌شوند که خاک سطحی ظرفیت باربری کافی داشته باشد، در حالی که پی‌های عمیق بار را به لایه‌های زیرین منتقل می‌کنند (برنان و همکاران، ۲۰۰۲). پی‌های کم‌عمق شامل منفرد، نواری و گسترده هستند. پی‌های منفرد برای بار ستون‌های منفرد طراحی می‌شوند اما در برابر لنگر خمشی ضعیف هستند (مانی‌بودو، ۲۰۰۸). پی‌های نواری برای بار دیوارها یا ستون‌ها استفاده می‌شوند و مصرف آرماتور کمتری دارند (اتکینسون، ۲۰۰۷؛ چاترجی و همکاران، ۲۰۱۴؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۲). پی‌های گسترده در خاک‌های با ظرفیت پایین توزیع یکنواخت تنش ایجاد می‌کنند اما پرهزینه‌تر هستند (اتکینسون، ۲۰۰۷؛ چاترجی و همکاران، ۲۰۱۴؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۲). پی‌های عمیق مانند فونداسیون شمعی برای خاک‌های ضعیف مناسب هستند و بار را به لایه‌های مقاوم‌تر منتقل می‌کنند (اتکینسون، ۲۰۰۷؛ کرم و همکاران، ۲۰۱۳؛ جیمز و اسمیت، ۲۰۱۵؛ مک‌کارتی، ۲۰۱۸). شمع‌ها بر اساس عملکرد (ورق، باربر، اتکایی، اصطکاک، فشرده‌ساز) و مصالح (چوبی، بتنی، فولادی، مرکب) طبقه‌بندی می‌شوند (اتکینسون، ۲۰۰۷؛ پارک و همکاران، ۲۰۱۴؛ تامر و کین، ۲۰۱۸؛ کرم و علی، ۲۰۱۳؛ مک‌کارتی، ۲۰۱۸، حقیقت جو و ذوالفقاری فر، ۲۰۲۲).

پژوهش‌های پیشین بر رفتار دینامیکی شمع‌ها تمرکز کرده‌اند. شیوا و همکاران (۲۰۲۴) روش تحلیل ساده برای پایداری لرزه‌ای خاکریزهای تقویت‌شده با شمع بتنی در خاک ماسه‌ای ارائه دادند که ضریب ایمنی را ۳۳ درصد کاهش یافته نشان داد. چن و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر ضخامت بالشتک بر نشست و تنش شمع را بررسی کردند و ضخامت ۰٫۵ تا ۲٫۶ متر را پیشنهاد دادند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) مدل فرکانسی برای پی‌های مرکب ارائه دادند. لی و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر شمع‌های ضد لغزش در زمین لغزش را تحلیل کردند. آل سعیدی و همکاران (۲۰۲۴) تقویت با ژئوستتیک را بررسی کردند که ظرفیت باربری را افزایش داد. لیو و همکاران (۲۰۲۳) رفتار انتقال بار پی مرکب با

باد و زلزله را تحمل کنند. فونداسیون‌های سطحی در این شرایط کارایی ندارند، زیرا عمق محدود آن‌ها بارها را تنها به خاک سطحی منتقل می‌کند و آسیب‌پذیری بیشتری در برابر نیروهای جانبی دارند (چن و همکاران، ۲۰۲۰). پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های نوین و روش‌های مهندسی، تحلیل دقیق‌تر شالوده‌های شمعی را ضروری کرده است. نرم‌افزارهای تخصصی و مدل‌سازی‌های عددی رفتار شمع‌ها را در انواع خاک شبیه‌سازی کرده و فونداسیون‌هایی مقاوم طراحی می‌کنند. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک تأثیر مستقیمی بر عملکرد شمع‌ها دارند؛ برای مثال، خاک‌های رسی نشست بیشتری ایجاد می‌کنند، در حالی که خاک‌های ماسه‌ای و شنی بار را یکنواخت‌تر توزیع می‌کنند (چن و همکاران، ۲۰۲۰). طراحی شالوده‌های شمعی در مواجهه با بارهای دینامیکی مانند زلزله اهمیت بالایی دارد. نیروهای لرزه‌ای می‌توانند تنش و کرنش شمع‌ها را تغییر دهند و منجر به نشست غیرقابل پیش‌بینی شوند. در مناطق زلزله‌خیز، تحلیل رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در خاک‌های ماسه‌ای و اشباع چالش‌برانگیز است. افزایش فشار آب منفذی منجر به روانگرایی شده و مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد. شمع‌ها باید برای تحمل این تغییرات طراحی شوند، به ویژه در سازه‌های بلند که گشتاورهای خمشی و برشی قابل توجهی ایجاد می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۱). راهکار مؤثر، استفاده از شالوده‌های شمعی است که بارها را به لایه‌های عمیق‌تر منتقل می‌کند و پایداری را افزایش می‌دهد. این شالوده‌ها در خاک‌های ضعیف یا تراکم‌پذیر عملکرد بهتری نشان داده و بار را یکنواخت توزیع می‌کنند (لی و همکاران، ۲۰۲۱). تحلیل‌های عددی پیشرفته امکان بررسی رفتار شمع‌ها تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی را فراهم کرده و به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند (چن و همکاران، ۲۰۲۰).

خاک‌های ریزدانه با رطوبت زیاد و مقاومت برشی پایین، چالش اساسی در طراحی ژئوتکنیکی هستند. نشست‌های شدید و مشکلات پایداری در سازه‌های ساخته شده بر این خاک‌ها مشاهده می‌شود. در زمان زلزله، این خاک‌ها حرکت‌های لرزه‌ای را تقویت کرده و بر دامنه، فرکانس و مدت زمان حرکت زمین تأثیر می‌گذارند (گارالا و همکاران، ۲۰۱۹). پوراابراهیم و ذوالفقاری فر، ۲۰۲۲). شمع‌های عمیق برای انتقال بار به لایه‌های مقاوم‌تر استفاده می‌شوند و این انتقال

هستند. پیشرفت‌های مدل‌سازی عددی ایمنی سازه‌ها را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. بررسی رفتار شمع‌ها در خاک‌های رسی و لایه‌ای از تحمل بارهای استاتیکی تا دینامیکی، ضرورت مهندسی ژئوتکنیک است. تحقیقات بیشتر در رفتار لرزه‌ای شمع‌ها و تأثیر ویژگی‌های خاک، ایمنی سازه‌های آینده را افزایش خواهد داد.

۲- پیشینه تحقیق

شمع‌ها به عنوان عناصر کلیدی پی‌های عمیق، نقش اساسی در پشتیبانی از سازه‌های مهندسی متنوع ایفا می‌کنند. این عناصر عمودی در حمایت از برج‌های انتقال، ساختمان‌های بلند، سدها، پل‌ها، مخازن نفت سنگین، توربین‌های بادی، سازه‌های دریایی، پی ماشین‌ها و سازه‌های نگهدارنده زمین کاربرد گسترده دارند. طبقه‌بندی شمع‌ها بر اساس نسبت طول به قطر (L/D) به دو دسته بلند (انعطاف‌پذیر) و کوتاه تقسیم می‌شود. شمع‌هایی با نسبت L/D بین ۱۰ تا ۳۰ به عنوان انعطاف‌پذیر شناخته می‌شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). شمع‌های کوتاه در برابر حرکات قوی زمین رفتار سفتی نشان می‌دهند، در حالی که شمع‌های بلند انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. شمع‌های بلند اغلب به صورت گروهی طراحی می‌شوند. ظرفیت گروه‌های شمع تحت تأثیر ویژگی‌های شمع‌های منفرد، خواص لایه‌های خاک، تعاملات سطح مشترک شمع-خاک و طبیعت بارهای اعمال‌شده قرار دارد. علاوه بر ظرفیت باربری عمودی تحت بارهای استاتیکی و ارتعاشات ماشینی، ظرفیت جانبی شمع‌ها به ویژه در برابر حرکات زمین‌لرزه‌ای اهمیت دارد. ظرفیت جانبی ناکافی می‌تواند منجر به شکست لرزه‌ای گروه شمع‌ها شود (فاین، ۲۰۰۵).

پژوهش‌های نظری بر رفتار دینامیکی شمع‌ها تمرکز دارند. وو و فین (۱۹۹۷) تحلیل الاستیک پایه‌های شمع را با روش اجزای محدود در حوزه فرکانس بررسی کردند، در حالی که وو و فین (۱۹۹۸) جنبه‌های غیرخطی را در حوزه زمان مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعات پایه‌ای برای درک پاسخ شمع‌ها تحت بارهای پویا فراهم می‌کنند. میلوناکیس و گازتاس (۱۹۹۹) مدل‌های تحلیلی برای پاسخ هارمونیک جانبی شمع‌ها در خاک لایه‌ای توسعه دادند که بر پایه فنرها و دمپرهای وابسته به فرکانس است. فین (۲۰۰۵) شیوه‌های مهندسی برای پیش‌بینی پاسخ شمع‌ها در خاک ضعیف لایه‌ای را ارزیابی کرد، با تکیه بر آزمایش‌های

ستون سنگی محصور را مطالعه کردند. چاندا و همکاران (۲۰۲۳) پاسخ لرزه‌ای پی رافت شمع‌بندی را تحلیل کردند. آمالو و جایاکشیمی (۲۰۲۲) اثر بالشتک در پی رافت غیرمتصل را بررسی کردند. تانگ و همکاران (۲۰۲۰) رفتار پی شمع تقویت‌شده با ژئوستتیک را تحت بار دینامیکی تحلیل کردند. کوپتا و آسکه (۲۰۱۸) دینامیک شمع در خاک ویسکوالاستیک را مدل‌سازی کردند. بهادری و اسدزاده (۱۴۰۲) تأثیر ستون‌های اختلاط و شنی در خاک روانگرا را بررسی کردند. قطبی و همکاران (۱۴۰۱) رفتار شمع فولادی در خاک روانگرا را تحلیل کردند. نوری و تیراندازیان (۱۴۰۰) تأثیر خاک روانگرا بر اندرکنش شمع-سازه را مطالعه کردند. اسلامی و همکاران (۲۰۱۱) کاهش جابه‌جایی و لنگر در پی رادیه-شمع را نشان دادند. هوریکوشی و همکاران (۲۰۰۳) اتصال گیردار را مؤثر دانستند. ناکای و همکاران (۲۰۰۴) عملکرد پی رادیه-شمع را برتر دانستند. مه‌آبادی و همکاران (۱۳۹۹) انتقال بار محوری را بررسی کردند. اردکانی و همکاران (۱۳۹۳) رفتار شمع تحت بار جانبی را تحلیل کردند. مظاهری و همکاران (۱۳۹۹) نشست گروه شمع را کمتر دانستند. شیروانی و همکاران (۱۳۹۸) جابه‌جایی احتمالاتی شمع را مدل‌سازی کردند. کیمورا و همکاران (۲۰۰۲) نیروی جانبی در زمین شیبدار را بررسی کردند. هی و همکاران (۲۰۰۵) فشار جانبی در خاک روانگرا را محاسبه کردند. اصغری و همکاران (۲۰۲۳) ضریب مقاومت شمع را کالیبره کردند. حسین احمد (۲۰۲۳) کارایی شمع‌های ماسه‌ای را برتر دانست. صالح عاشق‌آبادی و همکاران (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای در خاک رس را بررسی کردند. گارالا و همکاران (۲۰۱۹) پاسخ دینامیکی خاک رس را تحلیل کردند.

این پژوهش به بررسی رفتار دینامیکی پی‌های عمیق بتن مسلح مجهز به لایه‌های بالشتکی در خاک‌های رسی و لایه‌ای با استفاده از روش‌های عددی می‌پردازد. اهداف اصلی شامل ارزیابی تأثیر شتاب اوج ($0.4g$ و $0.6g$) بر لنگر خمشی شمع‌ها و بررسی اثر فرکانس موج (۵ و ۱۰ هرتز) بر رفتار شمع‌ها است. این اهداف به ارائه درک عمیق‌تری از رفتار دینامیکی شمع‌ها کمک کرده و در بهینه‌سازی طراحی شالوده‌های مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای نقش دارند. اهمیت این موضوع در توسعه مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی رفتار شمع‌ها در شرایط روانگرایی و کاهش خطرات زلزله است. شالوده‌های شمعی به دلیل قابلیت انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر، راهکاری مؤثر برای پایداری سازه‌های بلند

خمش از گسترش جانبی خاک و اینرسی فوقانی ناشی می‌شود، کماتش از کاهش محدودیت خاک تحت بار محوری و جانبی. نسبت لاغری تأثیرگذار است (بهاتاچاریا و همکاران، ۲۰۱۹؛ رستمی و همکاران، ۲۰۲۱). آسیب اغلب در سر شمع، پایین، مرز لایه‌ها یا مرز روان شده رخ داد. نمونه‌ها در زلزله‌های نیکاتا (۱۹۶۴)، سان فرناندو (۱۹۷۱)، لوما پریتا (۱۹۸۹) و کوبه (۱۹۹۵) مشاهده شده (بابت و همکاران، ۲۰۰۱؛ فاین و فوجیتا، ۲۰۰۲). مدل آسیب پلاستیسیته بتن لوبلینر و همکاران (۱۹۸۹) برای رفتار غیرخطی شمع‌ها مناسب است. تنش‌های کششی و فشاری تعریف می‌شوند. رفتار تک محوری در کشش و فشار بررسی می‌شود. خواص بتن شامل مدول الاستیسیته ۲۷۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰٫۲۰ است. منحنی‌های تنش-کرنش و پارامترهای آسیب در فشار و کشش رفتار الاستیک و غیرکشسان را نشان می‌دهند (لوبلینر و همکاران، ۱۹۸۹). سه پروفیل خاک مدل I (ماسه همگن روی بستر سنگی)، II و III (پنج لایه ماسه و رس با ضخامت متغیر) انتخاب شده‌اند. عمق ۳۰ متر، لایه خاک ۲۰ متر و بستر ۱۰ متر و مدل III لایه رس ضخیم‌تری بود. مدول ماسه ۴۰ مگاپاسکال و رس ۱۳ مگاپاسکال. مدل خطی-الاستیک با پلاستیک کامل و معیار موهر-کولمب استفاده شد. پتانسیل جریان هذلولی در نصف‌النهاری و بیضوی در انحرافی است. سخت‌شوندگی همسانگرد (راهنمای کاربر تجزیه و تحلیل آباکوس؛ آلزانو و آلونسو، ۲۰۰۵). خواص لایه‌ها شامل چگالی، مدول، پواسون، پیوستگی، اصطکاک، دیلاتاسیون و سرعت برشی. زاویه انبساط بستر صفر بود (آلزانو و آلونسو، ۲۰۰۵).

گروه‌های شمع ۱×۱، ۲×۲، ۳×۳ برای مکانیزم شکست انتخاب شده‌اند. شمع‌ها به قطرهای ۰/۸ و ۱ متر به طول ۲۰ متر و فاصله ۳ متر با نسبت‌های طول به قطر شمع (L/D) به مقدار ۲۵ و ۲۰ بودند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). نه مدل سه‌بعدی برای مدل‌های خاک توسعه یافته با عمق و قطر خاک ۳۰ و ۴۰ متر انتخاب شدند (ریس و وان، ۲۰۱۱). عناصر C3D8R و CIN3D8 برای خاک و شمع با شبکه بندی ریز برای شمع و درشت برای خاک با دقت با h و Δt کنترل شدند. $dh < V_{s,min} / (10f_{max})$ ارتفاع ۰/۵ متر، $0.001\Delta t$ ثانیه در نظر گرفته شد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). غیرخطی بودن مصالح و هندسه در نظر گرفته شده در سطح بالا آزاد، پایین ثابت با حرکت افقی با دیافراگم برابر در

میدانی و سانتیفریوژ. لیاناپاتیرا و پولوس (۲۰۰۵) مدل عددی برای پاسخ جانبی لرزه‌ای شمع‌ها در خاک ضعیف ارائه کردند که غیرخطی بودن مواد و کاهش سختی را لحاظ می‌کند. یانگ و جرمیک (۲۰۰۵) تأثیر لایه‌بندی خاک بر بارگذاری جانبی شمع‌ها در محیط الاستیک-پلاستیک را تحلیل کردند. براندربرگ و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌های مواد برای تعامل خاک-ساختار در OpenSees توسعه دادند و با آزمایش‌های سانتیفریوژ مقایسه کردند. بانرجی و همکاران (۲۰۱۴) اثرات لرزه‌ای بر شمع‌های سرثابت در خاک رس را با ترکیب آزمایش سانتیفریوژ و مدل‌سازی عددی بررسی کردند. تانگ و لینگ (۲۰۱۴) رفتار شکست شمع‌ها تحت روانگرایی را با آزمایش میز لرزان مطالعه کردند. شمع‌های بتنی درجاریز، که می‌توانند مسلح یا غیرمسلح باشند، با حفاری اولیه چاه (دستی یا ماشینی) اجرا می‌شوند و امکان شکل‌دهی پافیلی را فراهم می‌کنند. این شمع‌ها در خاک سست یا مستعد نشست شدید کاربرد دارند، جایی که خاکبرداری عمیق غیراقتصادی است. شمع‌ها بار روسازه را به لایه‌های مقاوم یا سنگ بستر منتقل می‌کنند. در خاک چسبنده، مقاومت اصطکاکی جداره شمع نشست را کنترل می‌کند (بودو، ۲۰۰۸). طبقه‌بندی شمع‌های درجاریز بر اساس انتقال بار است. حالت اتکایی تا لایه مقاوم، پافیلی در لایه‌های مناسب و نفوذ در سنگ از انواع آن هستند (کامساوارا، ۲۰۱۱).

انتقال بار در شمع پیچیده است. بار از صفر تا مقدار حداکثر در سطح زمین افزایش می‌یابد، بخشی توسط اصطکاک جداره (Q_1) و بخشی توسط نوک شمع (Q_2) جذب می‌شود. بار حمل شده در ارتفاع z تغییرات خاصی دارد و مقاومت اصطکاکی در واحد طول ($f(z)$) با عمق تغییر می‌کند. یکی شدن مقاومت اصطکاکی کمی پایین‌تر از میانه شمع رخ می‌دهد. با افزایش بار، ظرفیت کامل اصطکاکی و نوک فعال می‌شود. نشست ۵ تا ۱۰ میلی‌متر برای ظرفیت اصطکاکی کافی است، در حالی که برای نوک شمع نفوذ ۱۰ تا ۲۵ درصد قطر لازم است. در بار نهایی، Q_1 برابر ظرفیت اصطکاکی می‌شود (کامساوارا، ۲۰۱۱).

در مناطق لرزه‌خیز، شالوده‌های شمع در پروفیل‌های سست تا متوسط متراکم استفاده می‌شوند. آسیب‌های شمع تحت تأثیر سختی شمع، خواص خاک، تعامل خاک - شمع و ویژگی‌های لرزه‌ای است. آسیب‌ها شامل خمش، کماتش و نشست هستند (بهاتاچاریا و همکاران، ۲۰۱۹؛ رستمی و همکاران، ۲۰۲۱).

مهندسی برای پیش‌بینی پاسخ پایه‌های شمع در پروفیل‌های خاک ضعیف لایه‌ای در هنگام زلزله ارائه کرد که بر پایه یافته‌های آزمایش‌های میدانی، سانتریفیوژ مدل شمع و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی استوار است. لیاناپاتیرا و پولوس (۲۰۰۵) مدل عددی برای تحلیل پاسخ جانبی لرزه‌ای شمع‌ها در خاک‌های ضعیف ارائه کردند که کاهش سختی و استحکام خاک همراه با غیرخطی بودن مواد را در نظر می‌گیرد. یانگ و جرمیک (۲۰۰۲) اثرات لایه‌بندی خاک بر رفتار بارگذاری جانبی یک شمع در خاک‌های الاستیک-پلاستیک را تحلیل کردند. براندربرگ و همکاران (۲۰۰۵) مدل‌های مواد برای تعامل خاک-ساختار را در پلتفرم متن‌باز OpenSees توسعه دادند و با نتایج دو آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی سیستم‌های شمع در خاک‌های ماسه‌ای مقایسه کردند. بانرجی و همکاران (۲۰۰۷) تأثیرات لرزه‌ای روی شمع‌های سرثابت و برابر انتهایی نصب‌شده در خاک رس ماسه‌ای را بررسی کردند که آزمایش‌های سانتریفیوژ با مدل‌سازی عددی ترکیب شده است. تانگ و لینگ (۲۰۱۰) آزمایش‌های میز لرزان برای بررسی رفتار شکست پایه شمع‌ها در کلاهک بتن‌آرمه تحت روانگرایی خاک انجام دادند.

شمع به عنوان فونداسیون عمیق تعریف می‌شود. شمع‌های بتنی درجاریز در مقایسه با شمع‌های کوبشی می‌توانند مسلح یا غیرمسلح باشند. در این شمع‌ها، ابتدا حفاری چاه (دستی یا ماشینی) انجام می‌گیرد که امکان اجرای آن‌ها با کوره (به صورت پافیلی) را فراهم می‌کند. کاربرد شمع‌ها در مواقعی است که خاک سطحی سست یا محتمل نشست شدید است. در چنین حالتی، خاکبرداری عمیق تا رسیدن به خاک مقاوم توجیه ندارد و با اجرای شمع تا عمق خاک مقاوم یا سنگ بستر، بارهای ناشی از روسازه به لایه‌های مقاوم‌تر منتقل می‌شود. در زمین‌های با خاک چسبنده نیز شمع به موجب مقاومت بالای اصطکاکی جداره خود برای کنترل نشست به کار گرفته می‌شود (بودو، ۲۰۰۸). شمع‌های درجاریز بر اساس نحوه انتقال بار طبقه‌بندی می‌شوند. در شکل ۱-۳ برخی از انواع آنها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، حالت (a) شمع اتکایی تا رسیدن به لایه مقاوم اجرا شده است. حالت‌های (b) و (c) شمع‌های پافیلی هستند که در لایه‌های مناسب‌تر خاک نفوذ کرده‌اند و حالت (d) نفوذ شمع اتکایی در سنگ است (کامساوارا، ۲۰۱۱).

تماس پیوندی انتها. عناصر بی‌نهایت برای دیواره و تماس مماسی با اصطکاک ۰/۳۳، نوک صفر در نظر گرفته شد (هانینگان و همکاران، ۲۰۱۶).

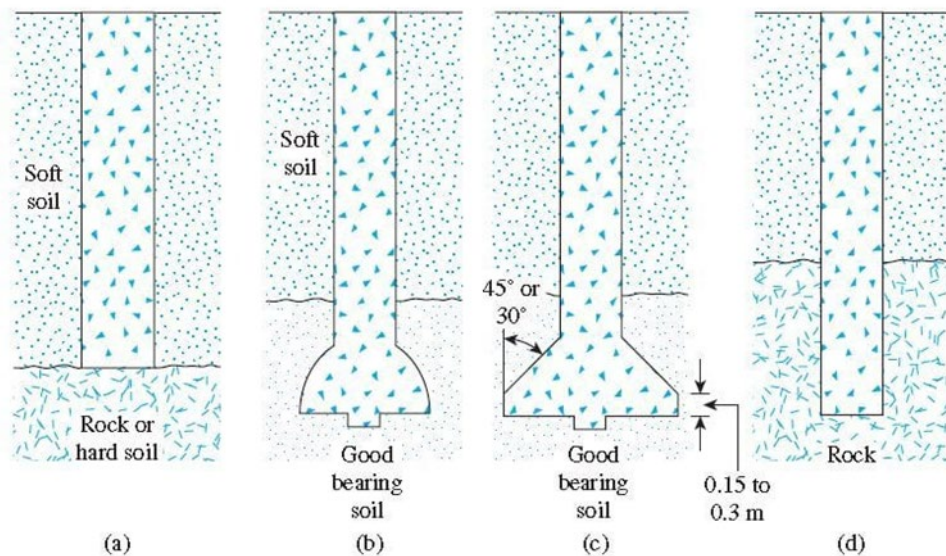
مدل‌ها برای مکانیسم شکست لرزه‌ای توسعه یافته‌اند. تحلیل ژئواستاتیکی پیش از لرزه‌ای انجام شد. تنش‌ها نزدیک تحلیلی. ورودی لرزه‌ای کلیدی (زوکا و همکاران، ۲۰۲۱). رکورد‌های ۱۹۹۹ دوزجه و کوچالی انتخاب. ویژگی‌ها شامل ایستگاه، تاریخ، فاصله، بزرگی، PGA و سرعت برشی بود (هاشاش و همکاران، ۲۰۱۷). مقیاس‌بندی با DEEPSOIL با 0.25g، 0.50g و 0.75g انجام شد (هاشاش و همکاران، ۲۰۱۷).

۱۰۸ تحلیل غیرخطی. بازه ۶ ثانیه‌ای برای کاهش زمان به ۷ ساعت با روش نیوتن-رافسون با $0.001\Delta t$ ، میرایی ۵ درصد، ریلی با فرکانس اول و پنجاهم، بیشینه تنش کششی برای شکست بررسی شد.

تحلیل با نرم افزار آباکوس که ابزار قدرتمندی بر پایه المان محدود برای تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری استاتیک و دینامیک و کاربردهای فراوان در هوافضا، اتومبیل، صنعتی و مهندسی عمران مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل‌سازی با این نرم افزار می‌تواند تحلیل رفتار لرزه‌ای شمع‌ها مرکب بالشتکی در خاک‌های لایه‌ای با تمرکز بر مدل‌های غیرخطی و تعاملات دینامیکی فراهم کند.

۳- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای شمع‌های بتنی انعطاف‌پذیر در خاک‌های لایه‌ای، از روش‌های عددی مبتنی بر تحلیل المان محدود استفاده شده است. این رویکرد امکان شبیه‌سازی دقیق برهم‌کنش خاک و شمع تحت بارهای دینامیکی را فراهم می‌کند. مبانی نظری پژوهش بر پایه مطالعات پیشین در زمینه رفتار دینامیکی شمع‌ها استوار است. وو و فین (۱۹۹۷) و (۱۹۹۸) بررسی جامعی بر رفتار الاستیک و غیرخطی پایه‌های شمع با استفاده از روش اجزای محدود در حوزه‌های فرکانس و زمان انجام دادند. میلوناکیس و گزاتاس (۲۰۰۱) مدل‌های تحلیلی ساده‌شده برای ارزیابی پاسخ هارمونیک جانبی شمع‌های منفرد و گروهی در خاک‌های لایه‌ای ارائه کردند که از فرمول وینکلر پویا مبتنی بر فنرها و دمپرهای وابسته به فرکانس بهره می‌برد. فین (۲۰۰۵) ارزیابی جامعی از شیوه‌های استاندارد



شکل ۱. حالت (a) شمع اتکابی تا رسیدن به لایه مقاوم اجرا شده است. حالت‌های (b) و (c) شمع‌های پافیلی می‌باشند که در لایه‌های مناسب‌تر خاک نفوذ کرده‌اند و حالت (d) نفوذ شمع اتکابی در سنگ (کامساوارا، ۲۰۱۱).

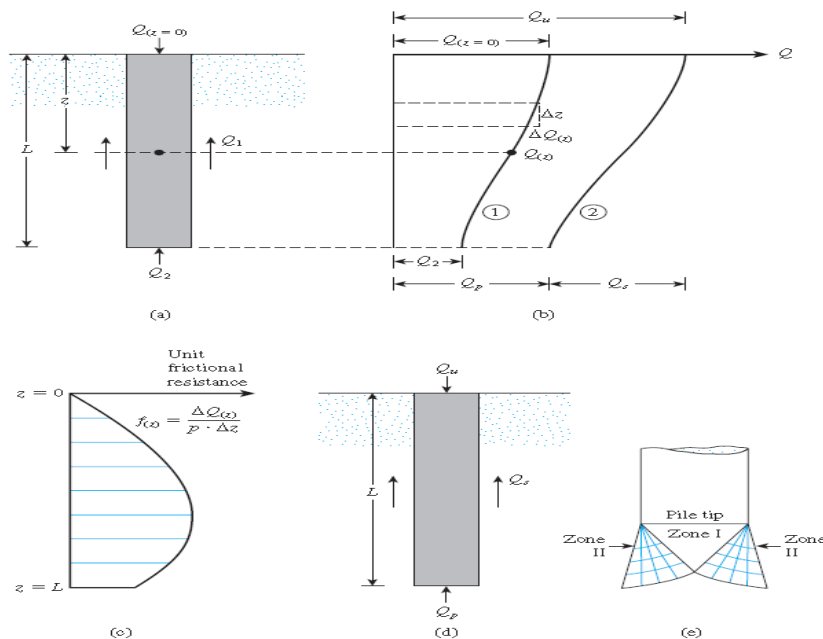
شمع‌های درجا کاربرد دارد). در بار نهایی، هنگامی که $Q(z=0)$ برابر Q_u گردد، $Q_1 = Q_s$ (کامساوارا، ۲۰۱۱).

شالوده‌های شمع معمولاً در مناطق لرزه‌خیز با پروفیل‌های خاک سست تا متوسط متراکم استفاده می‌شوند. آسیب‌های سازه‌ای شمع‌ها تحت تأثیر سختی شمع، خواص خاک اطراف، برهم‌کنش خاک و شمع، و ویژگی‌های لرزه‌ای قرار دارد. شمع‌ها ممکن است دچار آسیب‌هایی مانند خمش، کمایش و نشست شوند (بهاتاچاریا و همکاران، ۲۰۱۹؛ رستمی و همکاران، ۲۰۲۱). آسیب خمشی ناشی از گسترش جانبی خاک در اثر بارهای لرزه‌ای عرضی یا جانبی و اینرسی سازه فوقانی است. آسیب کمایش زمانی رخ می‌دهد که اثر محدودکنندگی خاک اطراف شمع در اثر بارگذاری محوری و جانبی کاهش یابد که تحت تأثیر نسبت لاغری شمع‌ها است (بهاتاچاریا و همکاران، ۲۰۱۹؛ رستمی و همکاران، ۲۰۲۱). آسیب شمع‌ها اغلب در نزدیکی سر شمع، پایین شمع، سطح مشترک لایه‌ها با تفاوت سختی یا مرز لایه‌های روان‌شده و غیرروان‌شده رخ می‌دهد.

نمونه‌هایی از آسیب در مرز لایه‌های ماسه‌ای و سخت در زلزله‌های نیگاتا (۱۹۶۴)، سان فرناندو (۱۹۷۱)، لوما پریتا (۱۹۸۹) و کوبه (۱۹۹۵) مشاهده شده است (بابت و همکاران، ۲۰۰۱؛ فاین و فوجیتا، ۲۰۰۲؛ ذوالفقاری فر و دیگران، ۲۰۱۵).

ساختار انتقال بار از شمع به خاک پیچیده است. برای فهم ساده‌تر، شمعی با طول L در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۲ ساختار انتقال بار فونداسیون شمع نشان داده شده است. بار وارد به شمع به صورت تدریجی از صفر تا $Q(z=0)$ نزدیک سطح زمین افزایش می‌یابد. بخشی از این بار توسط خاک اطراف جداره شمع به واسطه اصطکاک جذب شده (Q_1) و بخشی دیگر توسط خاک زیر نوک شمع جذب می‌گردد (Q_2) (کامساوارا، ۲۰۱۱). طبق بررسی‌های موجود، بار حمل شده توسط شمع در ارتفاع Z مطابق تغییرات منحنی ۱ در شکل ۲ (b) است. تغییرات مقاومت اصطکاک شمع در واحد طول ($f(z)$) نسبت به عمق خاک در شکل ۲ (c) نمایش داده شده است. یکی شدن مقاومت اصطکاک شمع در محلی کمی پایین‌تر از میانه شمع رخ می‌دهد. با افزایش تدریجی بار و فرو رفتن شمع در خاک، تمام ظرفیت اصطکاک و نوک شمع در طول آن یکی می‌گردد. مقدار نشست لازم جهت مشارکت کامل ظرفیت اصطکاک شمع فارغ از سایز و طول شمع بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر است. حداکثر ظرفیت مقاومت نوک شمع تا زمانی که مقدار نفوذ شمع در خاک بین ۱۰ تا ۲۵ درصد قطر آن نباشد، به وقوع نمی‌پیوندد (حد پایین در شمع‌های کوبشی و حد بالا در



شکل ۲. ساختار انتقال بار فنداسیون شمع (کامسوارا ۲۰۱۱)

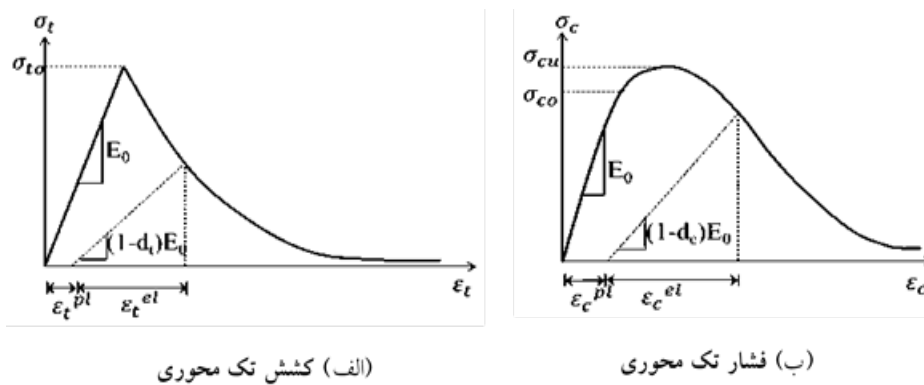
مدل III لایه‌های رس ضخیم‌تری نسبت به مدل II دارد. مدول الاستیسیته برای لایه‌های ماسه و رس به ترتیب ۴۰ مگاپاسکال و ۱۳ مگاپاسکال است. برای مدل‌سازی رفتار لایه‌های خاک، از مدل سازنده خطی-الاستیک با رفتار کاملاً پلاستیک استفاده شده که از معیار شکست موهر-کولمب بهره می‌برد. مدل پلاستیسیته موهر-کولمب از پتانسیل جریان صاف استفاده می‌کند که در صفحه تنش نصف‌النهاری شکل هذلولی دارد و در صفحه تنش انحرافی به صورت قطعات بیضوی تعریف می‌شود. سخت‌شوندگی چسبندگی به صورت همسانگرد فرض شده است (راهنمای کاربر تجزیه و تحلیل آباکوس؛ آلزانو و آلونسو، ۲۰۰۵).

جدول ۱. خواص مواد برای شمع‌های بتنی پژوهش

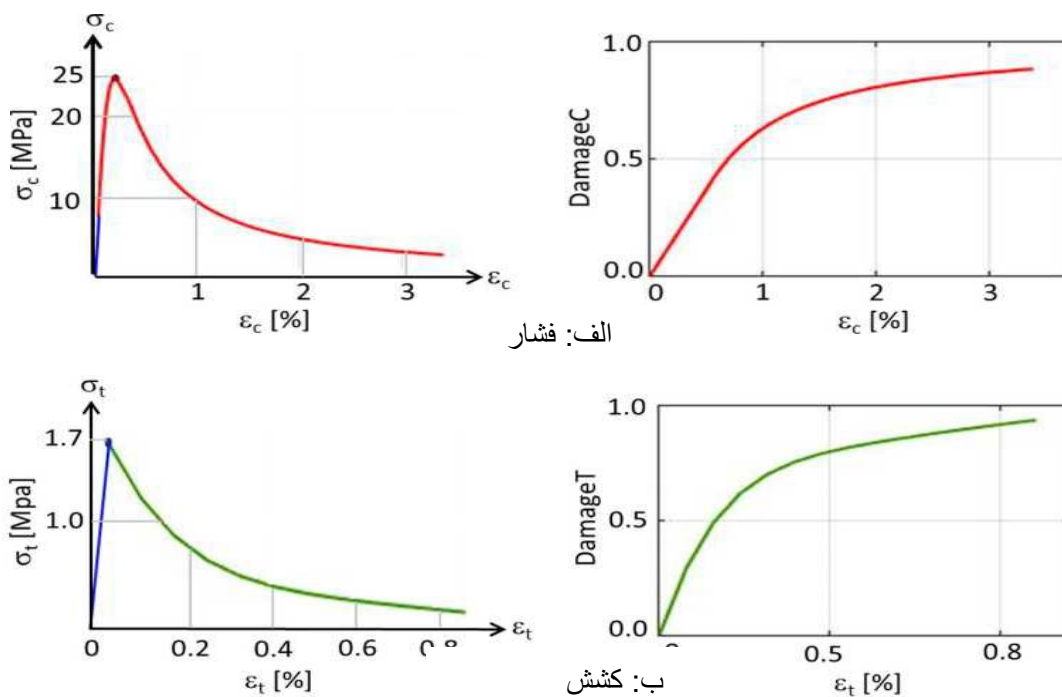
خواص بتن	
۲۷۰۰۰	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
۲۵۰۰	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۲۰	نسبت پواسون

مدل آسیب پلاستیسیته بتن پیشنهاد شده توسط لوبلینر و همکاران (۱۹۸۹) برای توضیح رفتار غیرخطی شمع‌های بتنی در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ رفتارهای کششی و فشاری تک محوری مدل آسیب پلاستیسیته بتن نشان داده شده است. تنش‌های کششی و فشاری σ_{cu} و σ_{to} تعریف می‌شوند. در جدول ۱ خواص مواد برای شمع‌های بتنی پژوهش ارائه شده است که شامل مدول الاستیسیته ۲۷۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۲۰ است. در شکل ۴ منحنی‌های تنش-کرنش در کشش و فشار و پارامترهای آسیب برای شمع‌های بتنی نشان داده شده است. رنگ آبی رفتار الاستیک، قرمز و سبز رفتار غیرکشسان را نشان می‌دهد (لوبلینر و همکاران، ۱۹۸۹).

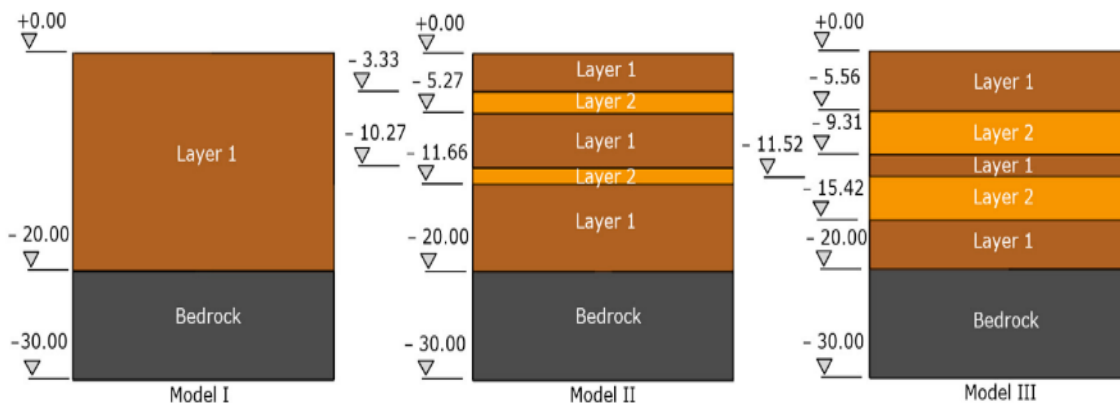
سه پروفیل مختلف از دامنه خاک با عنوان مدل‌های I، II و III انتخاب شده‌اند. در شکل ۵ ضخامت لایه‌های خاک انتخاب شده موضوع پژوهش نشان داده شده است. مدل I شامل لایه ماسه همگن بر روی بستر سنگی است، مدل‌های II و III از دامنه‌های پنج‌لایه‌ای با ضخامت‌های متغیر ماسه و رس همگن تشکیل شده‌اند. عمق کلی پروفیل خاک ۳۰ متر است که ضخامت لایه‌های خاک و بستر سنگی به ترتیب ۲۰ متر و ۱۰ متر است.



شکل ۳. منحنی‌های تنش-کرنش برای مدل آسیب پلاستیسیته بتن (لوبلینر و همکاران ۱۹۸۹)



شکل ۴. منحنی‌های تنش-کرنش و پارامترهای آسیب در فشار (الف) و کشش (ب) برای شمع‌های بتنی (لوبلینر و همکاران ۱۹۸۹)



شکل ۵. ضخامت لایه‌های خاک انتخاب شده موضوع پژوهش

در جدول ۲ خواص مکانیکی لایه‌های خاک موضوع پژوهش ارائه شده است که شامل چگالی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، پیوستگی، زاویه اصطکاک، دیلاتاسیون و سرعت موج برشی است. زاویه انبساط برای بستر سنگی صفر است (آلزانو و آلونسو، ۲۰۰۵).

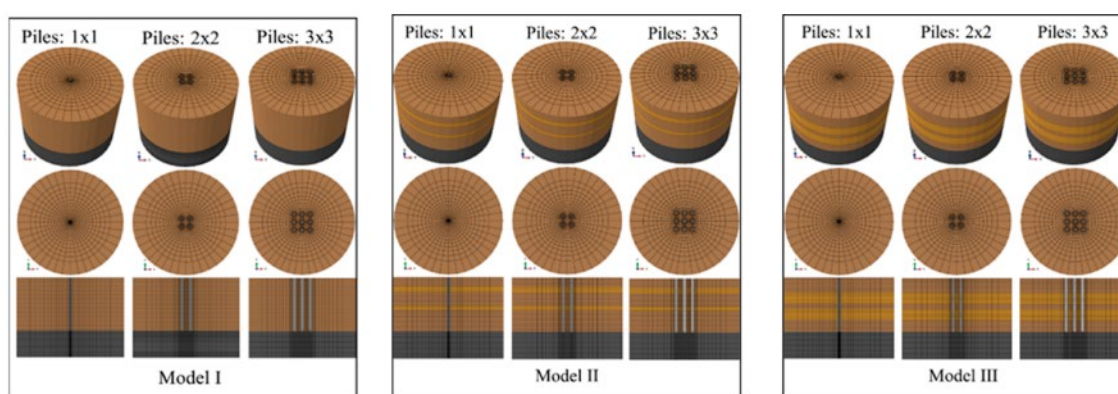
جدول ۲. خواص مکانیکی لایه‌های خاک موضوع پژوهش (آلزانو و آلونسو ۲۰۰۵)

لایه	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون	پیوستگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)	دیلاتاسیون زاویه (درجه)	موج برشی سرعت (متر بر ثانیه)
لایه ۱ (ماسه)	۱۸۰۰	۴۰	۲۵/۰	۰.۰۰	۳۶	۵	۲۹۸
لایه ۲ (رس)	۱۸۰۰	۱۳	۳۰/۰	۰.۰۰	۳۶	۵	۱۶۷
بستر	۲۵۰۰	۳۵۰۰	۳۵/۰	۲.۵۵	۳۸	۰	۲۲۷۷

استاندارد هشت‌گرهی هگزاگونال (C3D8R) تشکیل شده‌اند که توسط عناصر هشت‌گرهی هگزاگونال بی‌نهایت (CIN3D8) احاطه شده‌اند. برای شمع‌ها شبکه‌بندی ریز و برای خاک درشت‌تر استفاده شده است. دقت شبیه‌سازی توسط فاصله شبکه (h) و گام زمانی (Δt) کنترل می‌شود.

حداکثر فاصله شبکه $h < V_{s,min} / (10f_{max})$ است که $V_{s,min}$ حداقل سرعت موج برشی و f_{max} بیشینه فرکانس است. ارتفاع المان خاک ۰.۵۰ متر است. گام زمانی $t < h / V_{s,min}$ است و برابر ۰.۰۰۱ ثانیه انتخاب شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

گروه‌های شمع شامل آرایش‌های 1×1 ، 2×2 و 3×3 برای تعیین مکانیزم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های انعطاف‌پذیر بتنی انتخاب شده‌اند. قطر شمع‌ها (D)، 0.8 متر و 1 متر، طول (L)، 20 متر، فاصله میان شمع‌ها (S)، 3 متر است. نسبت L/D برای قطرهای 0.8 متر و 1 متر به ترتیب 25 و 20 بود، که در بازه شمع‌های انعطاف‌پذیر قرار دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). نه مدل سه‌بعدی اجزای محدود برای مدل‌های I، II و III توسعه یافته‌اند. در شکل ۷ مدل‌های شمع‌های پژوهش در لایه‌های مختلف خاک ارائه شده است. عمق و قطر دامنه خاک به ترتیب 30 متر و 40 متر است (ریس و وان، ۲۰۱۱). مدل‌ها از عناصر



شکل ۷. مدل‌های شمع‌های پژوهش در لایه‌های مختلف خاک

حرکت‌های افقی گروه شمع‌ها با مدل دیافراگمی برابر شده است. تماس پیوندی بین انتهای پایین شمع و خاک برقرار است. برای انتشار امواج در دیواره‌های جانبی، عناصر بی‌نهایت استفاده

این مطالعه غیرخطی بودن مصالح در بتن شمع‌ها و خاک، و غیرخطی بودن هندسی در ناحیه‌های برهم‌کنش را پرداخته است. سطح بالایی خاک آزاد است و سطح زیرین سنگ بستر ثابت.

ژئواستاتیکی عددی به نتایج تحلیلی نزدیک هستند. ورودی لرزه‌ای برای طراحی سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز مهم است (زوکا و همکاران، ۲۰۲۱). رکوردهای زلزله‌های ۱۹۹۹ دوزجه و کوچالی انتخاب شدند.

در جدول ۳ ویژگی‌های زلزله‌های ۱۹۹۹ کوچالی و دوزجه ارائه شده است که شامل ایستگاه، تاریخ، فاصله، بزرگی، PGA و سرعت موج برشی است (هاشاش و همکاران، ۲۰۱۷). رکوردها با نرم‌افزار DEEPSOIL V7 برای دستیابی به PGAهای 0.25g، 0.5g و 0.75g مقیاس‌بندی شدند. گزینه مقیاس‌بندی به شتاب حداکثری استفاده شد (هاشاش و همکاران، ۲۰۱۷).

شده است. برهم‌کنش خاک و شمع از طریق تماس مماسی و عمودی شبیه‌سازی شده است. سطوح اصلی (خارجی شمع) و فرعی (داخلی خاک) تعریف شده‌اند. تماس مماسی با ضریب اصطکاک ۰٫۳۳ است. در نواحی تماس شمع و دیواره خاک اصطکاک در نظر گرفته شده، در نوک شمع اصطکاک صفر است (هانینگان و همکاران، ۲۰۱۶).

مدل‌های سه‌بعدی اجزای محدود برای سیستم برهم‌کنش شمع-خاک توسعه داده شدند تا مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای گروه شمع‌های بتنی انعطاف‌پذیر در پروفیل‌های خاک ماسه‌ای لایه‌ای بررسی شود. پیش از تحلیل‌های لرزه‌ای، تحلیل‌های ژئواستاتیکی تحت بارهای گرانشی انجام شد. تنش‌های

جدول ۳. ویژگی‌های زلزله‌های ۱۹۹۹ کوچالی و دوزجه (هاشاش و همکاران ۲۰۱۷)

رویداد	ضبط دنباله	ایستگاه	تاریخ	Rrup (کیلومتر)	بزرگی	PGA (گرم)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
دوزجه	۱۶۰۲	بولو	۱۲ نوامبر ۱۹۹۹	۰۴/۱۲	۷/۱۴	۰/۱	۵۷/۲۹۳
کوچالی	۱۱۴۷	آمبرلی	۱۷ آگوست ۱۹۹۹	۶۲/۶۹	۵/۷	۲۵۳/۰	۰۰/۱۷۵

آباکوس است (راهنمای کاربر تجزیه و تحلیل آباکوس). کاربرد آباکوس در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل المان محدود مسائل مهندسی است. یکی از کاربردهای اصلی، تحقیقات آکادمیک بر مسائل مهندسی است و محبوبیت بالایی نزد دانشجویان، اساتید و مهندسان تحقیق و توسعه دارد. آباکوس در شرکت‌های خودروسازی، هواپیماسازی، پتروشیمی، زیست‌شناسی، عمران (مهندسی سازه)، تجهیزات صنعتی، بسته‌بندی، الکترونیک و تولید تجهیزات پیشرفته کاربرد دارد (راهنمای کاربر تجزیه و تحلیل آباکوس).

۴- یافته‌های حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها

جمع‌بندی داده‌ها و دستیابی به نتایج معتبر از جنبه‌های کلیدی هر تحقیق است. برخی پژوهشگران ممکن است به دنبال نتایج قابل قبول باشند، اما اعتبار واقعی یک مطالعه بر پایه راستی‌آزمایی و ارزیابی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده یا آزمایش‌های پیشین استوار است که می‌تواند مسیرهای نوینی برای پیشرفت اهداف پژوهشگر و علوم مرتبط باز کند. در این پژوهش، برای ارزیابی و مقایسه مدل آزمایشگاهی با مدل المان محدود، رویکرد مقایسه‌ای اتخاذ شده است. این فصل به بررسی

۱۰۸ تحلیل غیرخطی لرزه‌ای انجام شد. هر تحلیل متوسط یک روز زمان می‌برد، بنابراین بازه ۶ ثانیه‌ای انتخاب شد و زمان هر تحلیل به ۷ ساعت کاهش یافت. تحلیل‌ها با روش نیوتن-رافسون کامل و گام زمانی ۰٫۰۰۱ ثانیه انجام شد. نسبت میرایی میانگین ۵ درصد برای سیستم برهم‌کنش شمع-خاک در نظر گرفته شد. ضرایب میرایی ریلی با فرکانس‌های اول و پنجاهم محاسبه شد. برای ارزیابی رفتار شکست، بیشینه تنش‌های کششی اصلی بررسی شد. ترک‌ها زمانی ایجاد می‌شوند که تنش کششی به مقادیر حدی برسد. تحلیل‌های عددی با نرم‌افزار آباکوس انجام شد که یکی از قدرتمندترین ابزارهای تحلیل المان محدود است.

این نرم‌افزار برای تحلیل غیرخطی مواد تحت شرایط استاتیک، شبه‌استاتیک و دینامیک استفاده می‌شود و در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی، تجهیزات صنعتی و عمران (سازه، ژئوتکنیک و راه) کاربرد دارد. مدل‌های رفتاری متنوع آن را به گزینه برتر تبدیل می‌کند (راهنمای کاربر تجزیه و تحلیل آباکوس). آباکوس یونفایند اف‌ای‌ای مجموعه نرم‌افزاری مهندسی به کمک کامپیوتر و تحلیل براساس روش‌های المان محدود است. توسعه آن بر عهده شرکت سیمولیا، زیرمجموعه داسو سیستمز است. آوازه داسو سیستمز در توسعه نرم‌افزارهای قدرتمند دلیل محبوبیت

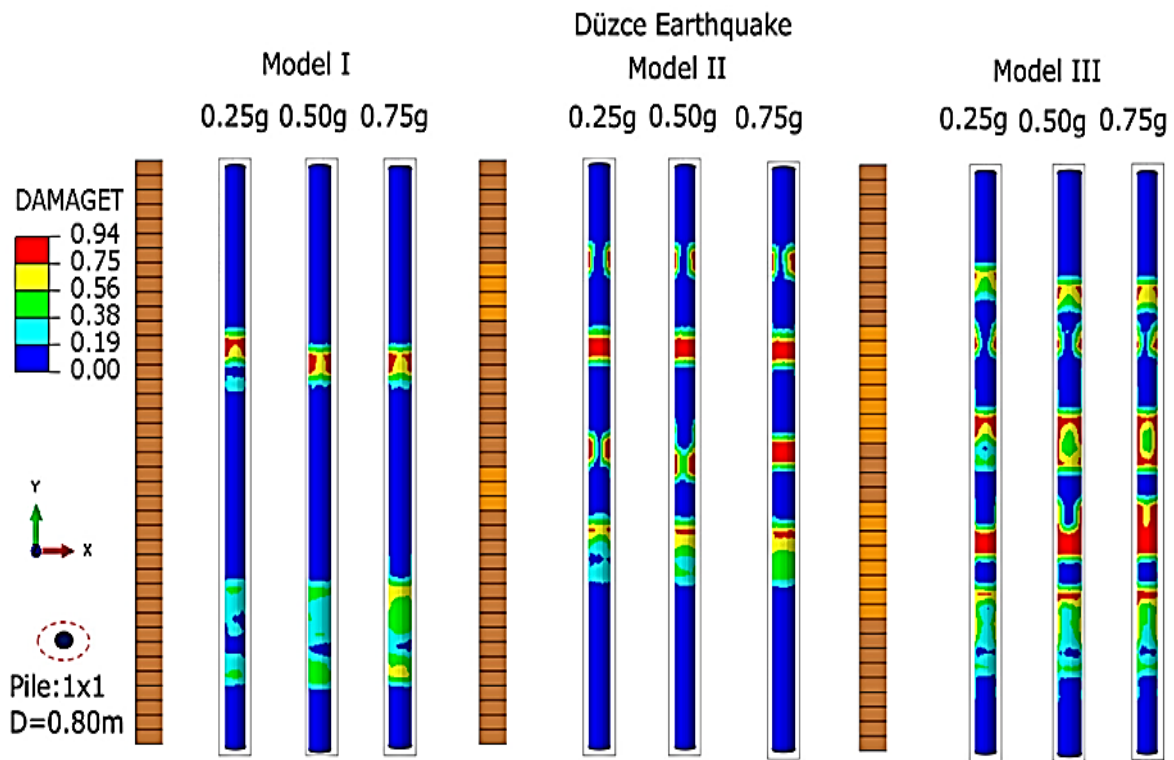
شکل ۸ توزیع نسبت‌های بیشینه آسیب کششی و تعداد عناصر آسیب‌دیده را برای شمع تکی با قطر ۰/۸ متر (پیکربندی ۱×۱) تحت زلزله‌های دوزجه و کوجائلی نشان می‌دهد. به طور مشابه، شکل ۹ همین توزیع را برای قطر ۱ متر ارائه می‌کند.

در مدل I (لایه ماسه همگن روی بستر سنگی)، آسیب جزئی و محدود برای هر دو قطر مشاهده می‌شود. اما در مدل II (پنج لایه با ضخامت متغیر ماسه و رس)، آسیب قابل توجه در نواحی لایه‌های رس ماسه‌ای رخ می‌دهد و توزیع آسیب گسترده‌تر از مدل I است. مدل III (با لایه‌های رس ضخیم‌تر)، افزایش چشمگیری در شدت و گستردگی آسیب نشان می‌دهد که ناحیه وسیع‌تری را پوشش می‌دهد. به طور کلی، با افزایش قطر شمع، میزان آسیب در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش ضخامت لایه رس منجر به افزایش توزیع و تعداد عناصر آسیب‌دیده می‌شود، که این یافته با روش‌شناسی پژوهش همخوان است، جایی که مدل‌های II و III لایه‌بندی پیچیده‌تری دارند و رفتار غیرخطی خاک (با معیار موهر-کولمب) شبیه‌سازی شده است.

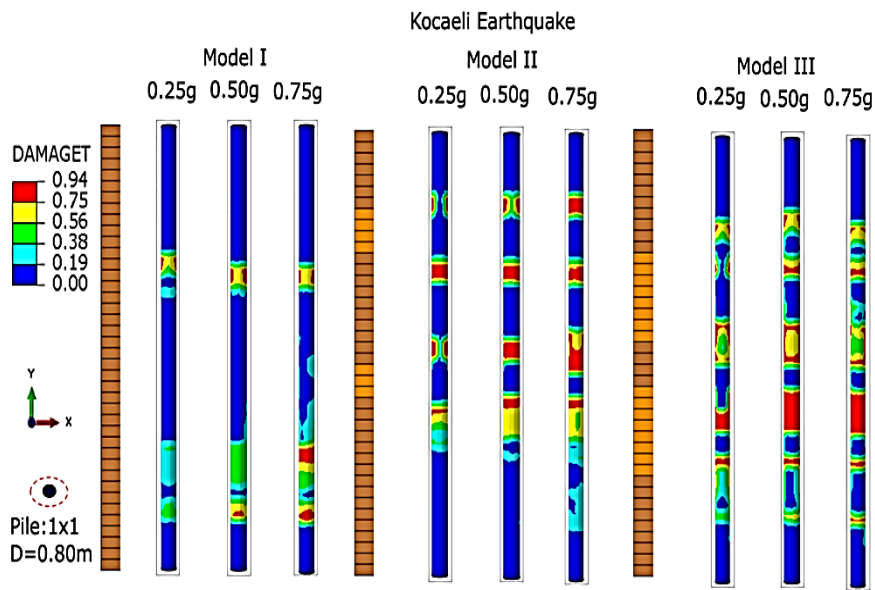
و مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های عددی می‌پردازد، با تمرکز بر مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های بتنی انعطاف‌پذیر در پروفیل‌های خاک لایه‌ای.

مقیاس‌های رنگی در شکل‌های ارائه‌شده، نسبت‌های آسیب کششی هر عنصر را نشان می‌دهند که با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. رنگ آبی آسیب صفر ($dt=0$) و رنگ قرمز آسیب کامل ($dt=1$) را بیان می‌کند. آسیب مدل اجزای محدود عموماً با نتایج تجربی همخوانی دارد، به ویژه زمانی که ضرایب آسیب کششی بیش از ۰,۹۰ هستند. در این تحلیل‌ها، پارامتر آسیب کششی (dt) برابر با ۰,۹۴ در نظر گرفته شده است، به طوری که نواحی قرمز آسیب حداقل ۹۴ درصدی را نشان می‌دهند. شکست شمع‌ها با این مقدار پارامتر آسیب مقایسه شده و توزیع‌های بیشینه آسیب کششی در انتهای مدت زمان رکوردهای زمین‌لرزه نمایش داده شده است.

مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای برای شمع تکی (۱×۱) و گروه شمع‌ها (۲×۲ و ۳×۳) با قطرهای ۰/۸۰ متر و ۱ متر در مدل‌های I، II و III (که شامل لایه‌های ماسه و رس با ضخامت‌های متفاوت هستند) برای شتاب اوج زمین (PGA) برابر با 0.25g، 0.5g و 0.75g در شکل‌های ۸ تا ۱۴ ارائه شده‌اند.

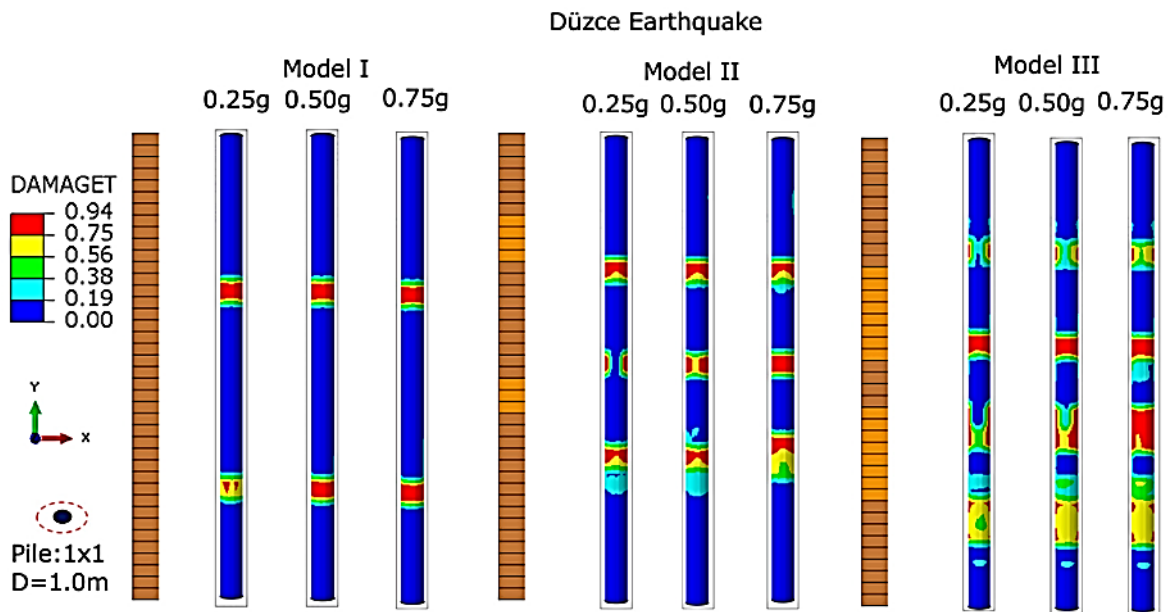


(a) Düzce earthquake

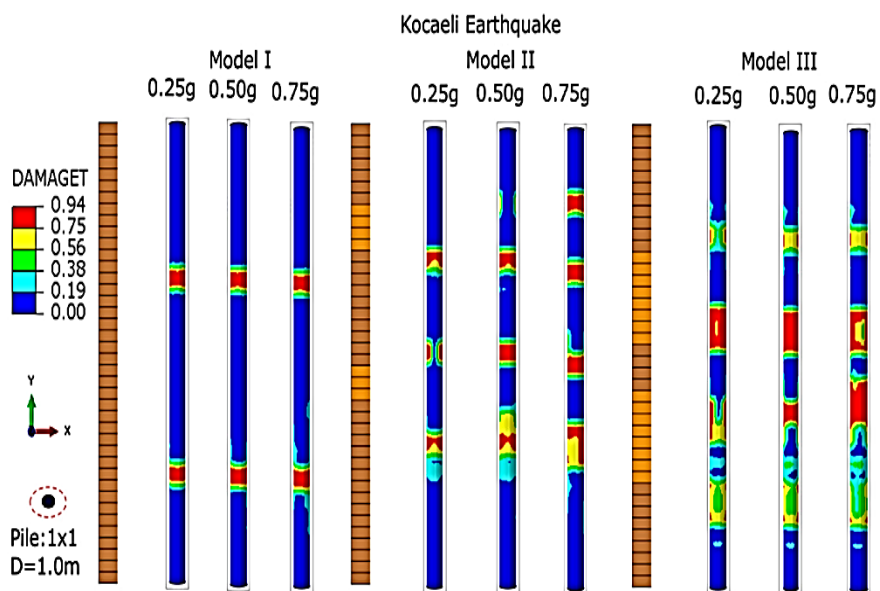


(b) Kocaeli earthquake

شکل ۸. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع ۱×۱ با قطر ۰/۸۰ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) کوجالی

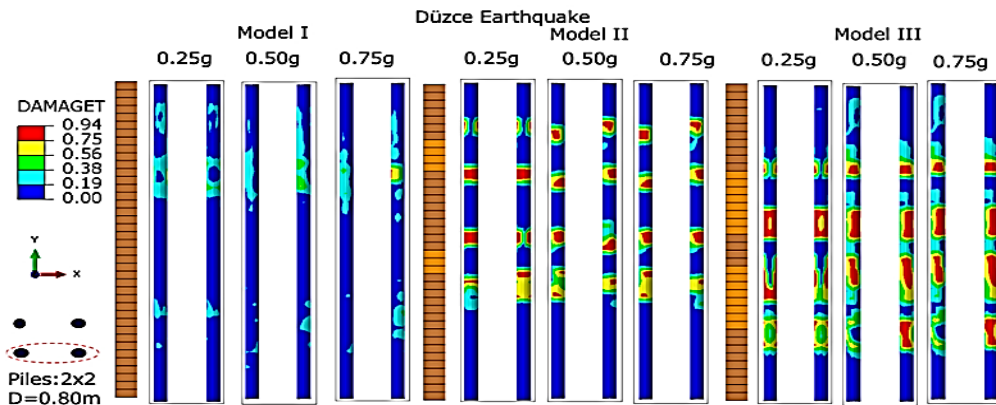


(a) Düzce earthquake

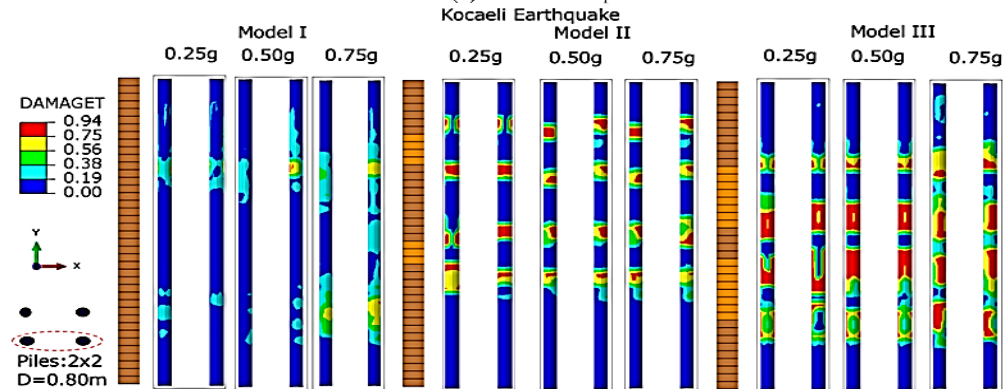


(b) Kocaeli earthquake

شکل ۹. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع ۱×۱ با قطر ۱ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) کوجالی

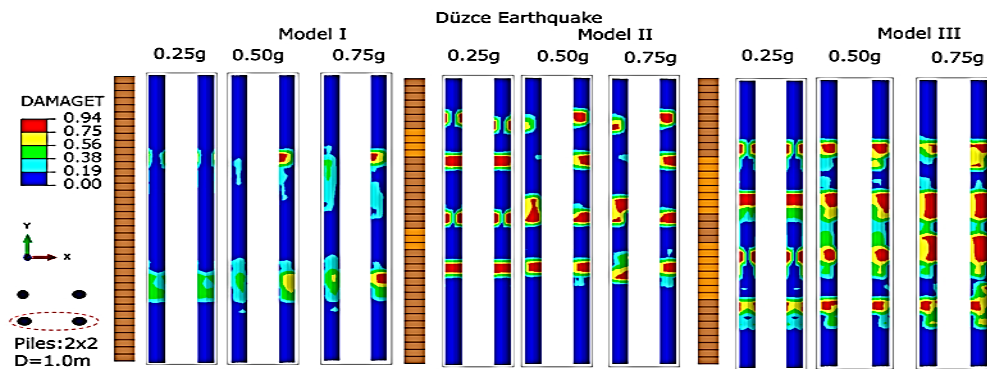


(a) Düzce earthquake

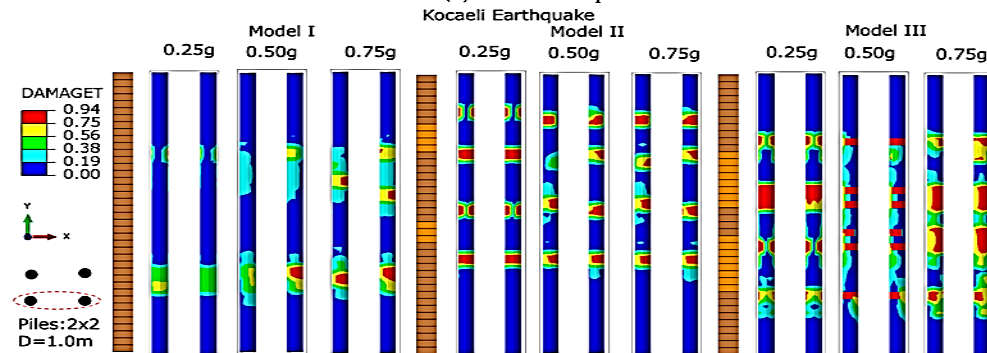


(b) Kocaeli earthquake

شکل ۱۰. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های ۲×۲ با قطر ۰/۸۰ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) زمین‌لرزه‌های کوچالی

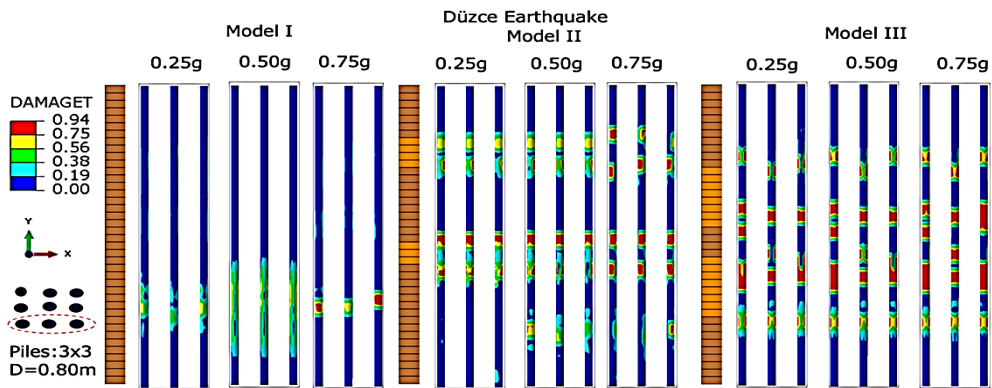


(a) Düzce earthquake

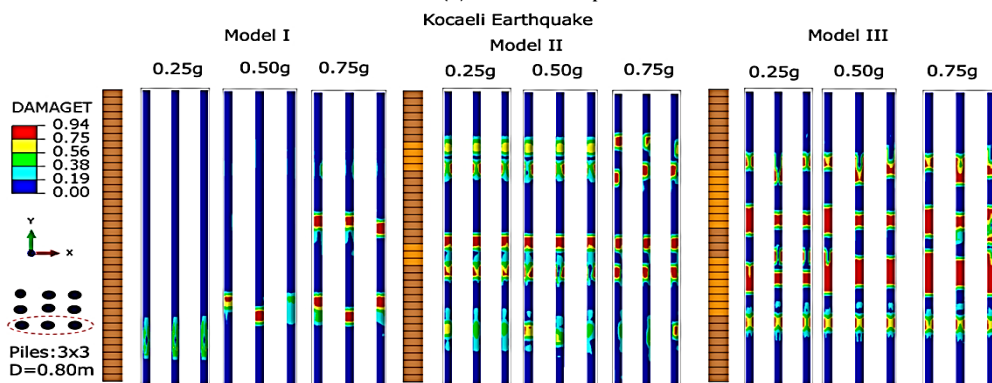


(b) Kocaeli earthquake

شکل ۱۱. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های ۲×۲ با قطر ۱ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) کوچالی

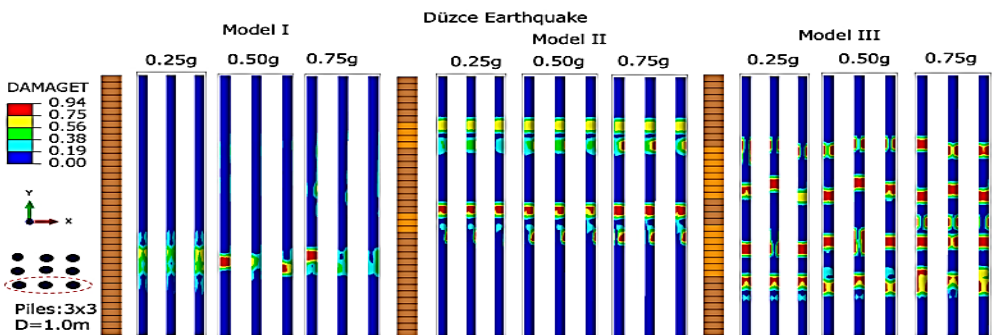


(a) Düzce earthquake

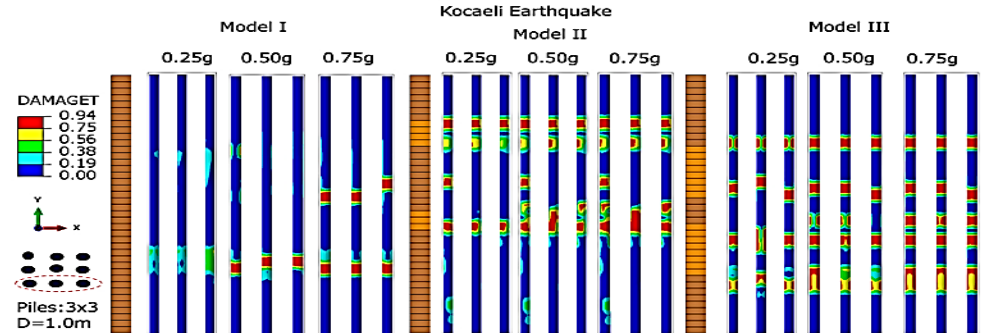


(b) Kocaeli earthquake

شکل ۱۲. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های ۳×۳ با قطر ۸۰/۰ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) زمین‌لرزه‌های کوجالی



(a) Düzce earthquake



(b) Kocaeli earthquake

شکل ۱۳. مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های ۳×۳ با قطر ۱ متر برای (a) زلزله‌های دوزچه و (b) کوجالی

پیکربندی بر مکانیسم‌های شکست لرزه‌ای شمع‌های بتنی مرکب بالشتکی انعطاف‌پذیر است.

لایه‌های رس ماسه‌ای عامل تعیین‌کننده در گسترش و شدت آسیب شمع‌ها هستند. این لایه‌ها به دلیل خصوصیات مکانیکی ضعیف، پتانسیل بالایی برای افزایش تغییرشکل و تمرکز تنش دارند. افزایش ضخامت لایه رس منجر به گسترش دامنه آسیب شده و نواحی وسیع‌تری از سیستم شمع-خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این یافته در مدل III (با لایه رس ضخیم‌تر) برجسته تر بود، جایی که آسیب گسترده‌تر از مدل‌های I و II مشاهده شد. مقایسه با پیشینه تحقیق نشان داد این نتیجه با مطالعه گارالا و همکاران (۲۰۱۹) همخوان بود که رفتار دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای و برهمکنش آن‌ها با شمع‌ها را بررسی کردند و تأکید کردند پاسخ خاک رس به شدت زلزله و سختی لایه وابسته است، که بر عملکرد شمع‌ها تأثیر مستقیم دارد. همچنین، صالح عاشق‌آبادی و همکاران (۲۰۲۰) با مدل سختی غیرخطی در خاک رس کائولن، نشان دادند فاصله شمع‌ها و شدت زلزله بر لنگر خمشی و اندرکنش تأثیر می‌گذارد، که با تمرکز آسیب در مرز لایه‌های رس-ماسه پژوهش حاضر هم‌راستا بود.

شتاب اوج زمین به عنوان پارامتر کلیدی در آغاز و گسترش آسیب شناسایی شد. در شتاب 0.25g آسیب محدود بود، اما در 0.5g و به ویژه 0.75g، دامنه و شدت آسیب افزایش یافت. این نتیجه بر لزوم در نظر گرفتن شتاب‌های بالا در طراحی لرزه‌ای تأکید می‌کند. مقایسه یافته‌های این تحقیق با نتایج تحقیق ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت نزدیکی داشت که پارامترهایی مانند شتاب اوج زلزله بر رفتار شمع تأثیر مستقیم دارند. همچنین، لی و همکاران (۲۰۲۱) در تحلیل رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در خاک اشباع، افزایش فشار آب منفذی و روانگرایی را عامل کاهش مقاومت دانستند، که با تشدید آسیب در شتاب بالاتر این پژوهش همخوان بود. نوری و تیراندازیان (۱۴۰۰) نیز تأثیر مشخصات لایه روانگرا بر اندرکنش شمع-سازه توربین‌های بادی را بررسی کردند و نشان دادند با افزایش تراکم خاک، روانگرایی کاهش یافت، که نقش شتاب در آسیب‌های ایجاد شده ابنیه در این پژوهش را بیان می‌کند.

توزیع آسیب و تعداد عناصر آسیب‌دیده تحت زلزله کوجانلی بیشتر از دوزجه بود، که به طیف فرکانسی و شدت لرزه‌ای مرتبط است. این تفاوت اهمیت تحلیل لرزه‌ای خاص هر پروژه را

شکل ۱۰ مکانیسم‌های شکست برای گروه شمع ۲×۲ با قطر ۰.۸۰ متر را در مدل‌های I، II و III نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۱۱ توزیع آسیب برای قطر ۱ متر را ارائه می‌کند. در مدل I، برای شتاب‌های 0.25g و 0.5g آسیب قابل توجهی مشاهده نمی‌شود، اما در 0.75g نشانه‌های آسیب جزئی ظاهر می‌گردد. مدل II شروع آسیب را نشان می‌دهد و با افزایش شتاب، نواحی آسیب‌دیده و تعداد عناصر افزایش می‌یابد. مدل III با لایه رس گسترده‌تر، افزایش قابل توجهی در آسیب و عناصر آسیب‌دیده دارد. گسترش آسیب عمدتاً در نزدیکی لایه‌های رس رخ می‌دهد، که این با شبیه‌سازی برهم‌کنش غیرخطی خاک-شمع (با تماس مماسی و ضریب اصطکاک ۰.۳۳) در روش پژوهش هم‌راستا است. تعداد عناصر آسیب‌دیده در قطر ۰.۸۰ متر بیشتر از ۱ متر است، که به دلیل ظرفیت باربری بالاتر قطر بزرگ‌تر است و عملکرد کلی شمع‌ها را بهبود می‌بخشد.

شکل ۱۲ توزیع آسیب برای گروه ۳×۳ با قطر ۰.۸۰ متر را نشان می‌دهد و شکل ۱۳ برای قطر ۱ متر است. در مدل I، آسیب محدود است و با افزایش شتاب کمی افزایش می‌یابد. مدل II آسیب را در نزدیکی لایه‌های رس تشدید می‌کند و با شتاب بالاتر افزایش می‌یابد. مدل III افزایش قابل توجهی در ناحیه آسیب‌دیده و تعداد عناصر نشان می‌دهد، که بیشتر از مدل‌های I و II است. این نتایج با روش شناسی همخوان هستند، جایی که تحلیل‌های غیرخطی با گام زمانی ۰.۰۰۱ ثانیه و میرایی ۵ درصد انجام شده و رکوردهای زلزله مقیاس‌بندی شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند که افزایش ضخامت لایه رس (از مدل I به III) توزیع آسیب را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش قطر شمع آسیب را کاهش می‌دهد. آسیب عمدتاً در مرز لایه‌های رس رخ می‌دهد و با شتاب بالاتر تشدید می‌شود. این یافته‌ها اعتبار مدل المان محدود را با مقایسه توزیع آسیب (dt=0.94) تأیید می‌کنند و مسیرهایی برای بهینه‌سازی طراحی شمع‌ها در خاک لایه‌ای باز می‌کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی مدل آزمایشگاهی با مدل المان محدود از طریق رویکرد مقایسه‌ای انجام شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیرات کلیدی لایه‌های رس ماسه‌ای، شتاب اوج زمین، قطر شمع و

(۲۰۰۲) نیروی جانبی در زمین شیبدار را بررسی کردند که کاهش به سمت پایین را نشان داد، مشابه تمرکز آسیب در مرز لایه‌ها. هوریکوشی و همکاران (۲۰۰۳) اتصال گیردار را مؤثر در کاهش لنگر خمشی دانستند، که با اهمیت مرز لایه‌ها هم‌راستا است. پیکربندی شمع‌ها تأثیر داشت؛ شمع تکی به دلیل عدم توزیع نیروها نسبت به شمعهای گروهی آسیب بیشتری را تجربه کرد. نشست گروه شمع نسبت به شمعهای تکی ۳۰ درصد کمتر بود که در مقایسه با نتایج تحقیقات مظاهری و همکاران (۱۳۹۹) و ناکای و همکاران (۲۰۰۴) مقدار کاهش آسیب با اعمال شمعهای گروهی همخوان بود. با تأکید بر مدل‌سازی دقیق خاک سه مدل برهم‌کنش نشان داد، مدل III آسیب بیشتری دارد و کاهش جابه‌جایی و لنگر در رادیه-شمع را نشان داد، و با نتایج اهمیت مدل برهم‌کنش اسلامی و همکاران (۲۰۱۱) هم‌راستا است. بنابراین این تحقیق مکانیسم‌های شکست را بررسی کرد و تأثیر وضعیت لایه رس، مقدار شتاب زلزله، مقدار قطر و پیکربندی شمعهای مرکب بالشتکی را بر رفتار اینه نشان داد. نتایج می‌تواند راهنمایی برای طراحی در مناطق لرزه‌خیز باشد و یافته‌های تحقیق مسیرهای نوینی برای تحقیقات آینده باز کند.

برجسته می‌کند. و در مقایسه با نتایج تحقیقات هی و همکاران (۲۰۰۵) که فشار جانبی در خاک روانگرا را محاسبه کردند و پیشنهاد دادند به صورت یکنواخت یا مثلثی در نظر گرفته شود، با تأثیر زلزله‌ها در پژوهش حاضر هم‌راستا است. همچنین، قطبی و همکاران (۱۴۰۱) رفتار شمع فولادی در خاک روانگرا را تحلیل کردند و نشان دادند فرکانس بارگذاری بر افزایش فشار آب حفره‌ای تأثیر دارد، که بیان‌کننده تفاوت تأثیر زلزله‌ها است. ارتباط مستقیم بین قطر شمع و کاهش آسیب برجسته بود. شمع‌های با قطر ۸۰/۸۰ متر آسیب کمتری نسبت به ۸۰/۸۰ متر نشان دادند، به دلیل افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییرشکل. این نتیجه پیشنهاد می‌کند در مناطق لرزه‌خیز از قطر بزرگ‌تر استفاده شود. مقایسه با پیشینه، اردکانی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند افزایش قطر، مدول الاستیسیته و طول شمع جابه‌جایی جانبی را کاهش می‌دهد، که با یافته‌های حاضر همخوان است. همچنین، حسین احمد (۲۰۲۳) کارایی شمع‌های ماسه‌ای را برتر از سیمانی دانست و افزایش طول را مؤثر بر ظرفیت باربری، که مشابه تأثیر قطر در پژوهش است. آسیب‌ها عمدتاً در نقاط اتصال لایه‌های ماسه و رس متمرکز بودند، به دلیل تفاوت مکانیکی و تمرکز تنش. این نقاط بحرانی در تحلیل لرزه‌ای شناسایی شدند. مقایسه، کیمورا و همکاران

۶- مراجع

-Asghari Pari, S., & Fakharian, K. (2023). Separate resistance factors for driven pile foundations in cohesive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(5), 04023015.
 -Atkinson, J. (2007). The mechanics of soils and foundations. *CRC Press*.
 -Ay, F., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2020). Role of cushion layer in composite pile foundations: Numerical simulations. *Geotechnical Testing Journal*, 43(2), 345-358.
 -Banerjee, S., Goh, S. H., & Lee, F. H. (2007). Seismic effects on fixed-head and end-bearing piles in soft clay. *Geotechnique*, 57(2), 189-200.
 -Behdori, F., & Asadzadeh, F. (1402). Investigation of dynamic response of deep mixing columns and sand columns in liquefiable layer with different thicknesses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 18(4), 567-582.
 -Bhattacharya, S., Lombardi, D., & Muir Wood, D. (2019). Seismic design of foundations: Concepts and applications. *ICE Publishing*.

-Aal Saady, A. M., Al-Obaidi, S. M., & Al-Dujaili, M. A. (2024). The effect of cushion reinforced with geosynthetics on the behavior of partially connected piled raft foundations in dry and saturated sandy soils using shaking table. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(1), 123-140.
 -Alejano, L. R., & Alonso, E. (2005). Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(4), 481-507.
 -Ammalu, R., & Jayakesmi, R. (2022). Analysis of cushion effects in non-connected piled raft foundations under seismic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107045.
 -Ardakani, A., Mohammadi, A., & Ghazi Mirsaeid, S. A. (1393). Numerical investigation of single pile behavior under lateral load. In *Proceedings of the First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tehran, Iran.

- Garala, T. K., & Madabhushi, G. S. P. (2019). Seismic behaviour of soft clay and its influence on the response of friction pile foundations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(4), 1919-1939.
- Gupta, A., & Aske, A. (2018). Timoshenko beam theory-based dynamic analysis of laterally loaded piles in viscoelastic layered soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(9), 04018062.
- Haghighatjoo, S. M., & Zolfegharifar, S. Y. (2022). Effects of fibre type and content on unconfined compressive strength of fibre-reinforced lime or cement-stabilised soils. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(6), 1962-1972.
- Hannigan, P. J., Rausche, F., Likins, G. E., Robinson, B. R., & Becker, M. L. (2016). Design and construction of driven pile foundations. *Federal Highway Administration*.
- Hansbo, S. (1984). Foundations on friction creep piles in soft clays. In *Proceedings of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Missouri, USA.
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2017). Deepsoil 7.0 user manual. *University of Illinois Urbana-Champaign*.
- Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., Watanabe, T., & Fukuyama, N. (2003). Performance of piled raft foundations under static and dynamic loading. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 3(2), 37-50.
- Hussein Ahmad. (2023). Two-dimensional study of the inclusions of skirt sand and deep cement piles to improve the load-displacement behavior of circular foundations on soft clay soil. *Heliyon*, 9(2), e13627.
- Hy, C., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2005). Seismic behavior of single and group piles in liquefiable soil: Shaking table and numerical analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7-10), 595-606.
- Kameswara Rao, N. S. V. (2011). Foundation design: Theory and practice. *John Wiley & Sons*.
- Kimura, T., Nakabayashi, O., & Saitoh, K. (2002). Centrifuge tests on lateral forces on piles in sloping ground. *Geotechnique*, 52(3), 197-204.
- Kupata, A., & Aske, A. (2018). Dynamic analysis based on Timoshenko beam theory of laterally loaded piles in viscoelastic layered soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(9), 04018062.
- Lang, R., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2022). Rigid pile composite foundations in soft soil: Advances in design. *Geotechnical Engineering Journal*, 53(1), 45-58.
- Li, J., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2024). Experimental study on seismic reinforcement of bridge pier foundation on clay landslide with
- Bobet, A., Garcia, S., Fernandez, G., & Rodriguez, C. (2001). Seismic design of deep foundations. *Joint Transportation Research Program*, Purdue University.
- Brandenberg, S. J., Boulanger, R. W., Kutter, B. L., & Chang, D. (2005). Material models for soil-structure interaction in OpenSees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1262-1274.
- Brandenberg, S. J., Boulanger, R. W., Kutter, B. L., & Chang, D. (2013). p-y plasticity model for nonlinear dynamic analysis of piles in liquefiable soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8), 1262-1274.
- Brennan, A. J., Klar, A., & Madabhushi, S. P. G. (2002). Types of shallow foundations. *Geotechnical Engineering Handbook*, 45-67.
- Budhu, M. (2008). Foundations and earth retaining structures. *John Wiley & Sons*.
- Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., & Sahoo, S. (2023). Recent advances in the response of combined piled raft foundations under seismic loads using static and dynamic approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107678.
- Chatterjee, S., Jain, A. K., & Chandak, N. R. (2014). Strip and grid foundations: Design principles. *Journal of Structural Engineering*, 140(7), 04014032.
- Chen, J., Yang, G., Zhang, L., & Gong, L. (2024). Investigation on the reinforcement characteristics of thick cushion layer and rigid pile composite foundation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 789-802.
- Chen, Z., Yang, G., Zhang, L., & Gong, L. (2020). Soil properties and their impact on pile performance. *Journal of Geotechnical Engineering*, 146(5), 04020023.
- Eslami, M. M., Arefi, M. J., Alipanah, M., & Hosseini, S. S. (2011). Seismic behavior of piled raft foundations: Numerical modeling. *Computational Methods in Civil Engineering*, 2(2), 185-199.
- Finn, W. D. L. (2005). A study of piles during earthquakes: Issues of design and analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3(2), 141-234.
- Finn, W. D. L., & Fujita, N. (2002). Piles in liquefiable soils: Seismic analysis and design issues. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-11), 731-742.
- Foo, C. L., & Li, Y. (2021). Vertical load transfer behavior in rigid pile composite foundations: Centrifuge model tests. *Geotechnical Testing Journal*, 44(4), 890-905.
- Fu, Q., & Li, Y. (2021). Vertical load transfer in rigid pile composite foundations and adjacent excavation effects: Centrifuge studies. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(8), 04021067.

- Journal of Geotechnical Engineering*, 138(6), 712-720.
- Pourebrahim, F., & Zolfegharifar, S. Y. (2022). Research Article Stabilizers Effects Comprehensive Assessment on the Physical and Chemical Properties of Soft Clays.
- Qotbi, M., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (1401). Coupled dynamic analysis of thick steel piles located in liquefiable soil layers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 19(2), 234-248.
- Reese, L. C., & Van Impe, W. F. (2011). Single piles and pile groups under lateral loading. *CRC Press*.
- Rostami, R., Bhattacharya, S., Hytiris, N., & Mickovski, S. B. (2021). The dynamic behaviour of pile foundations in seismically liquefiable soils/failure mechanisms, analysis, re-qualification. *In Earthquakes-From Tectonics to Buildings*. IntechOpen.
- San, L., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2019). Liquefaction effects on pile foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(7), 04019032.
- Shirvani, R., & Johari, A. (1398). Probabilistic investigation of pile displacement under dynamic loading using Winkler method. *Civil Engineering Journal*, 35(4.1), 141-149.
- Shiyao, J., & Wang, Z. (2023). Simplified analysis method for seismic and static stability of embankments supported by concrete piles in soft ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107678.
- Tang, L., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2020). Behavior of geosynthetics-reinforced pile foundation under long-term dynamic loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 105978.
- Tang, L., & Ling, X. (2014). Response of a RC pile group in liquefiable soil: A shake-table investigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 301-315.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. *John Wiley & Sons*.
- Trandigo, F., Pisanò, F., Di Prisco, C., & Mussi, A. (2015). Numerical modeling of pile-soil interaction in composite foundations. *Computers and Geotechnics*, 68, 212-225.
- User's manual for Abaqus analysis. (n.d.). Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Wang, L., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2020). A unified lateral soil reaction model for monopiles in soft clay considering various length-to-diameter (L/D) ratios. *Ocean Engineering*, 212, 107492.
- Wu, G., & Finn, W. D. L. (1997). Dynamic elastic analysis of pile foundations using the finite element method in the frequency domain. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1), 34-43.
- inclined intermediate layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107812.
- Li, Y., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2021). Seismic behavior of piles in saturated sands: Numerical studies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(5), 1345-1362.
- Liu, C., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2023). Static and dynamic load transfer behaviors of geosynthetics-encased stone column reinforced composite foundation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, 107678.
- Liyanapathirana, D. S., & Poulos, H. G. (2005). Seismic lateral response of piles in liquefying soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1466-1479.
- Long, J. H., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2022). Rigid pile composite foundation for soft soil improvement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(4), 04022015.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Onate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299-326.
- Mahabadi, M. J., & Sanaei Rad, A. (1399). Numerical simulation of finite difference method FDM for evaluating axial loading of single pile structure. *In Proceedings of the Tenth National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering and Environment*, Shirvan, Iran.
- Mani Bodu, R. (2008). Single footings: Limitations and design. *Foundation Engineering Review*, 25(3), 112-125.
- Mazhari, A., & Hasanpour, S. (1399). Investigation and comparison of single pile and pile group behavior under dynamic loading. *Transportation Research Journal*, 17(4), 345-358.
- McCarthy, D. F. (2018). Essentials of soil mechanics and foundations. Pearson Education.
- Milonakis, G., & Gazetas, G. (1999). Lateral vibration and internal forces of grouped piles in layered soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), 16-25.
- Mohsen Saleh Asheghabadi, & Xiaohui Cheng. (2020). Investigation of seismic behavior of clay-pile using nonlinear kinematic hardening model. *Advances in Civil Engineering*, 2020, Article ID 9617287.
- Nakai, S., Kato, H., Ishida, R., Mano, H., & Nagata, M. (2004). Load bearing mechanism of piled raft foundation during earthquake. *In Proceedings of the Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, Menlo Park, CA, USA.
- Nouri, A., & Tirandazian, M. (1400). The effect of liquefiable soil layer characteristics on soil-single pile-wind turbine structure interaction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 208, 104456.
- Park, J., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2012). Mat foundations in low bearing capacity soils.

- Zhang, Z., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2024). Analytical solutions for dynamic characteristics of rigid pile composite foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107812.
- Zheng, J., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2002). Role of cushion in CFG pile composite foundations. *Geotechnical Engineering Journal*, 33(4), 567-578.
- Zucca, M., Crespi, P., Longarini, N., & Valente, M. (2021). On the influence of shallow underground structures in the evaluation of the seismic signals. *Ingegneria Sismica*, 38(1), 23-35.
- Zolfegharifar, S. Y., Daram, H., & Rahimi, M. (2015). Static Analysis, Using Finite-Element Method (FEM) for Micropiles Application Evaluation: Empirical and Numerical Perspective. *Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, 36(4).
- Yang, Z., & Jeremic, B. (2005). Study of soil layering effects on lateral loading behavior of piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(6), 762-770.
- Yeu, Y., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2021). New type of composite pile foundation with cap beam for soft soil reinforcement. *Geotechnical Engineering Journal*, 52(3), 456-468.
- Zhang, L., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2017). Seismic behavior of piles in dynamic loading: Parameters and design. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(14), 2401-2418.
- Zhang, L., & Liu, H. (2017). Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101, 209-224.
- Zhang, Z., Chen, Y., Yang, G., & Zhang, L. (2014). Winkler model for dynamic response of composite caisson-piles foundations: Seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 241-251.

Behavioral Performance of Deep Reinforced Concrete Cushion Foundations in Layered and Clayey Soils under Dynamic Loading

Sayyed Yaghoub Zolfegharifar, Department of Civil Engineering and Architecture, Yasuj, C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

Farnaz Ranjbaran, Department of Civil Engineering and Architecture, Kazeroon, C., Islamic Azad University, Kazeroon, Iran.

Mohammad Negarchi, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: sy.zolfegharifar@iaau.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

In the construction of bridges, buildings and structures, in road construction and building operations on weak soil layers, problems such as soil deformation and general instability of the foundation may occur, especially when natural foundations are used. One of the effective solutions to overcome these problems is the use of a rigid cushion pile composite foundation that transfers the loads of the structure to deeper layers and increases the bearing capacity. The main objective of this research is to evaluate the effect of changes in peak ground acceleration and wave frequency on the bending moment of piles. The effect of changes in these parameters on the maximum bending moment of piles was analyzed and the frequency at which the maximum bending moment occurs was determined. The results show that soft clay layers have a significant effect on the spread and severity of seismic damage to piles. The most damage was observed in models with a thicker clay layer, especially model III. Also, peak ground acceleration was identified as one of the key factors in the spread of damage; So that at 0.25g the damage was limited, but at 0.75g it was extensive and severe. Increasing the diameter of the piles from 0.80m to 1m resulted in a reduction in the damage. In addition, individual piles suffered more damage than the pile group. The damage distribution was mainly concentrated at the junctions of the sand and clay layers. This study emphasizes the importance of accurate soil modeling and appropriate configuration of composite cushion piles for seismic resistant design.

Keywords: Composite Cushion Foundation, Clay Soil, ABAQUS, Dynamic Loading, Behavioral Performance