

تحلیل اثر نسبت طول به قطر و فاصله شمع‌ها در گروه شمع بر توابع امیدانس و انتقال در یک مدل مربوط به اندرکنش خاک-شمع-سازه*

کامران پناغی^(۲)احمدرضا محبوبی^(۱)

چکیده در گذشته تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، با توجه به اثر خاک زیرین در افزایش میرایی و زمان تناوب حرکت سازه نسبت به تکیه‌گاه صلب، با چشم‌پوشی از اندرکنش خاک با پی و اعمال حرکت لرزه‌ای به تکیه‌گاه سازه در سطح زمین صورت می‌گرفت. با این حال، بزرگ‌نمایی حرکت سیستم در برخی موارد موجب تردید در فرض محافظه‌کارانه بودن این رویکرد گردید. هدف مطالعه‌ی حاضر بررسی اثر پارامترهای نسبت طول به قطر و فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ است. افزایش نسبت‌های طول و فاصله به قطر شمع‌ها منجر به افزایش مقدار توابع انتقال در اندرکنش سینماتیک می‌گردد. این اثرات در اندرکنش وابسته به اینرسی به صورت کاهش قسمت حقیقی تابع امیدانس و افزایش قسمت مجازی آن خود را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی اندرکنش سینماتیک، اندرکنش وابسته به اینرسی، پی‌های شمعی، تابع انتقال، تابع امیدانس.

The Effects of Piles Spacing and Length to Diameter Ratios on the Soil-Pile-Structure Interaction Phenomenon

A. Mahboubi

K. Panaghi

Abstract The seismic analysis of structures in the past relied on the assumed soil desirable effects as the elongation of excitation period with higher damping. Therefore, imposing earthquake loading at the foundation level fulfilling higher safety requirements was the common practice until occasional movement amplifications demanded more rigorous research. The goal of the current study is to scrutinize the effects of length to diameter and spacing to diameter ratios on the response of soil-pile group-structure systems of 2x2 and 3x3 arrangements. The mentioned parameters' increase in the kinematic interaction study resulted in higher transfer functions. Such changes lead to decrease in the real part and increase in the imaginary part of the impedance functions in the inertial interaction study.

Key Words Kinematic Interaction, Inertial Interaction, Pile Foundation, Transfer Function, Impedance Function.

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۵/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۳/۲۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤل، دانشیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

(۲) دانشجوی دکترای خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

مقدمه

یکی از کاربردهای مهم شمع ها استفاده از آنها به عنوان پی برای سازه‌هایی است که تحت لرزش ماشین آلات دوار (پمپ‌های دورانی، توربین‌ها و ...) می‌باشند. در این گونه سازه‌ها شمع‌ها نه تنها موجب افزایش سختی پی می‌گردند، بلکه اندرکنش آنها با خاک اطراف تأثیرات مثبتی بر خصوصیات دینامیکی کل سازه می‌گذارد. علاوه بر این، شمع‌ها به عنوان پی در سازه‌های بنا شده بر خاک نرم برای بهبود خواص خاک و نیز انتقال بارهای سازه‌ای به لایه‌های مستحکم تحتانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. افزایش مقاومت سازه‌های بلند حساس در برابر بارگذاری جانبی نیز از دیگر موارد کاربرد این گونه پی‌ها می‌باشد. مسائل اندرکنشی به طور کلی در پدیده‌هایی که در آنها دو جسم دارای سختی متفاوت در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، مطرح می‌شوند. این مسأله در مورد پی‌های شمعی نیز با توجه به این که شمع دارای جنس متفاوتی از خاک اطراف می‌باشد، صادق است. در نتیجه این پدیده و پاسخ متفاوت اجسام، توزیع نیروها و لنگرهای متفاوتی در سازه و نیروهایی پیش‌بینی نشده در خاک ایجاد خواهند شد. تغییر مکان‌های حاصل از بارگذاری لرزه‌ای نیز از این قاعده مستثنی نیستند. در گذشته، تحلیل لرزه‌ای سازه‌های دارای پی‌های شمعی بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش سینماتیک خاک-شمع، با اعمال حرکت لرزه‌ای به تکیه‌گاه سازه در سطح زمین صورت می‌پذیرفت. این فرض که به دلیل اعمال حرکت ورودی زلزله در سنگ بستر به سازه به طور مستقیم محافظه کارانه تلقی می‌شد، با انجام تحقیقات بیش تر در مورد اندرکنش سینماتیک خاک-شمع و مشاهدهی بزرگ‌نمایی حرکت سازه در نتیجه این پدیده، مورد تردید قرار گرفت [1]. مطالعات بیش تر در این زمینه بر لزوم بررسی اندرکنش خاک-شمع-سازه به عنوان عاملی تعیین کننده در طراحی ایمن سازه‌ها صحه گذاشت [2]. علاوه بر این، افزایش بیش از حد زمان

تناوب بارگذاری در برخی مواقع، موجب عدم تطابق طیف پاسخ سازه در واقعیت با طیف پاسخ آئین‌نامه‌ای گردید. اثرات جنبشی به وسیله‌ی توابع انتقال وابسته به فرکانس که به صورت نسبت حرکت پی به حرکت میدان آزاد در غیاب سازه تعریف می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مطالعات انجام شده در این حوزه اغلب با استفاده از روش‌های تحلیلی ساده شده مانند رویکرد تیر بر بستر ارتجاعی [3-6] و یا روش‌های عددی انجام می‌شوند [7,8]. مدل تیر بر پی وینکلر برای نخستین بار در سال ۱۹۷۰ با موفقیت در تحلیل‌های دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت [9]. پس از آن بحث چگونگی رفتار غیرخطی خاک با استفاده از رویکردهای عددی (روش اجزای محدود، روش المان‌های مرزی) مورد بررسی بیش تر واقع شد [10,11]. توسعه و تبیین روابط حاکم در روش اجزای مرزی برای بارگذاری لرزه‌ای به وسیله‌ی محققان بسیاری صورت گرفته است [12-18]. روش‌های المان مرزی قادر به اثر دادن رفتار غیرخطی خاک و یا سطح تماس خاک و شمع نمی‌باشند. با این حال، این روش برای محدوده‌ی وسیعی از مسائل که شامل موج‌های لرزه‌ای متفاوت مانند موج‌های رایلی می‌شوند، مناسب است.

بایستی توجه داشت که مسأله‌ی اندرکنش خاک-سازه-پی مسأله‌ای همبسته می‌باشد که در آن اندرکنش خاک با پی (شمع) بر پاسخ سازه اثر می‌گذارد و پاسخ سازه نیز متقابلاً تغییراتی را بر اندرکنش خاک با پی موجب می‌گردد. این سیکل رفتاری اغلب در بین مهندسان عمران با گرایش‌های زلزله و ژئوتکنیک با رویکردهای تا حدودی متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که مهندسان زلزله خاک در تماس با پی را به صورت فنرهایی با سختی مشخص مدل می‌کنند و برای دربرگرفتن اثرات میرایی نیز از میراگرهایی که با فنرها موازی می‌شوند استفاده می‌کنند و سازه را به گونه‌ای واقعی تر با در نظر گرفتن نرمی

آن نیروها و تغییر مکان‌های دینامیکی اضافی را متحمل می‌شوند. این امر به دلیل اندرکنش وابسته به اینرسی است. انعطاف‌پذیری پی به عنوان تکیه‌گاه، شتاب سازه را از خود متأثر می‌سازد. انعطاف‌پذیری پی و میرایی مربوط به اندرکنش خاک-شمع به وسیله‌ی تابع وابسته به فرکانس امپدانس پی (امپدانس دینامیکی) بیان می‌شود. مطالعه‌ی پدیده‌ی اندرکنش خاک-شمع سازه در حالت کلی و با دقت بالا توسط رویکرد مستقیم که در آن کل سیستم مورد نظر به صورت یکپارچه مدل شده و اثرات رفتار خمیری نیز در صورت وقوع قابل بررسی است، می‌تواند انجام شود. این روش با وجود مطلوب بودن از نظر دقت نتایج، به دلیل هزینه‌ی بالای زمانی و محاسباتی مقرون به صرفه نبوده و بنابراین استفاده از روش‌های جایگزین در بین محققین هنوز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این میان، استفاده از رویکرد برهم‌نهی که در آن دو پدیده‌ی اندرکنش جنبشی و وابسته به اینرسی به صورت جداگانه بررسی شده و در خاتمه تلفیق می‌گردند، از محبوبیت خاصی برخوردار است. این روش هرچند با فرض رفتار خطی در سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به‌طور کلی دقت لازم در تحلیل‌های مذکور را به دست می‌دهد.

مطالعات بسیاری برای درک به‌تر اثر پدیده اندرکنش خاک-شمع - سازه انجام پذیرفته است [1-19]. مطالعه حاضر نیز بر بررسی اثر نسبت طول به قطر شمع‌ها و نسبت فاصله‌ی بین شمع‌ها به قطر در گروه شمع بر توابع امپدانس و انتقال در پدیده‌ی اندرکنش خاک-شمع - سازه به وسیله‌ی نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS 6.8 متمرکز شده است. در این بررسی، خاک به صورت یک محیط پیوسته با رفتار غیرخطی محدود که مقدار بار متناظر آن ابتدا برای هر مدل تحت بارهای مختلف استاتیکی بررسی و تعیین گردیده است، در نظر گرفته شده و شمع‌های بتنی دارای رفتار الاستیک خطی با رفتار سر آزاد می‌باشند.

بیش‌تر آن در مقایسه با جرم متمرکز در نظر می‌گیرند. در این رویکرد زمان تناوب طبیعی سازه به صورت دقیق‌تر بررسی می‌شود و مدهای ارتعاشی بالاتری (به صورت مؤثر) در تحلیل‌ها تحت پوشش قرار می‌گیرند. پیامد این رویکرد آن است که رفتار خاک به صورت غیرواقعی مدل می‌شود و بنابراین حل مزبور از دیدگاه مهندسان ژئوتکنیک چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. این مسأله به صورت عکس برای دیدگاه ژئوتکنیکی قابل طرح است که در آن سازه به صورت جرمی متمرکز مدل شده و سعی در مدل‌سازی رفتار خاک به گونه‌ای واقعی‌تر می‌باشد. در این مقاله نیز از آن‌جا که در بحث اندرکنش وابسته به اینرسی، بایستی از اینرسی جرم سازه در تحلیل‌ها بهره گرفت، از جامع‌ترین واژه مورد استفاده توسط محققان یعنی عنوان «اندرکنش خاک-شمع سازه» با توجه به نکات مذکور استفاده شد. در غیاب سازه‌ی اصلی حرکت پی ممکن است متفاوت از حرکت میدان آزاد باشد. میدان آزاد معرف منطقه‌ای از خاک است که به اندازه‌ی کافی از پی دور می‌باشد، به طوری که پی حرکت میدان آزاد را از خود متأثر نمی‌سازد. این تفاوت در نتیجه‌ی مکانیزم اندرکنش سینماتیک است. اثرات سینماتیک به وسیله‌ی توابع انتقال وابسته به فرکانس تعریف می‌شوند. تابع انتقال به صورت نسبت حرکت پی به حرکت میدان آزاد در غیاب سازه تعریف می‌شود. پس از تغییر اولیه در حرکت لرزه‌ای زمین که ناشی از وجود پی در منطقه‌ی مورد نظر می‌باشد، بایستی در تحلیل دقیق مسائل لرزه‌ای اثر اندرکنش سینماتیکی شمع و خاک در بارهای اعمال شده به سازه و اثر بارهای اینرسی واردشونده از سازه به پی مورد بررسی قرار گیرند. ارتعاشات سازه اصلی در نتیجه حرکت پی (متأثر از اندرکنش سینماتیک) موجب ایجاد نیروهای اینرسی سازه‌ای و لنگرهای واژگون‌کننده در تکیه‌گاه سازه می‌شود. در نتیجه‌ی این پدیده، پی و خاک اطراف

پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه، شمع‌ها بتنی و به قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند. طول شمع‌ها در حالات مختلف تحلیل برابر با ۸، ۱۰ و ۱۲/۵ متر در نظر گرفته شده‌است و بنابراین نسبت طول به قطر شمع‌ها به ترتیب برابر با ۱۶، ۲۰ و ۲۵ به دست آمد. هم‌چنین نسبت فاصله به قطر شمع‌ها برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شد. در مطالعه‌ی اثر نسبت فاصله‌ی بین شمع‌ها به قطر در گروه شمع بر پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه جنس شمع‌ها از بتن و طول و قطر آن‌ها به ترتیب برابر با ۸ و ۰/۴ متر (نسبت طول به قطر برابر با ۲۰) در نظر گرفته شد. سه نسبت فاصله به قطر برابر با ۲/۵، ۴ و ۶ برای در نظر گرفتن اثرات تغییر عمل کرد گروهی بر نتایج تحلیل‌ها انتخاب گردیدند. قابل ذکر است که سرشمع‌ها در کلیه‌ی تحلیل‌ها دارای ضخامت ۰/۶ متر و سطح بالایی سرشمع‌ها هم‌سطح با سطح زمین در نظر گرفته شدند. در ادامه، از مطالعه‌ی اثر نسبت طول به قطر شمع بر پدیده‌ی اندرکنش خاک- شمع- سازه به‌عنوان مطالعه‌ی اول و از مطالعه‌ی اثر نسبت فاصله بین شمع‌ها به قطر در گروه شمع بر این پدیده به‌عنوان مطالعه‌ی دوم یاد می‌شود.

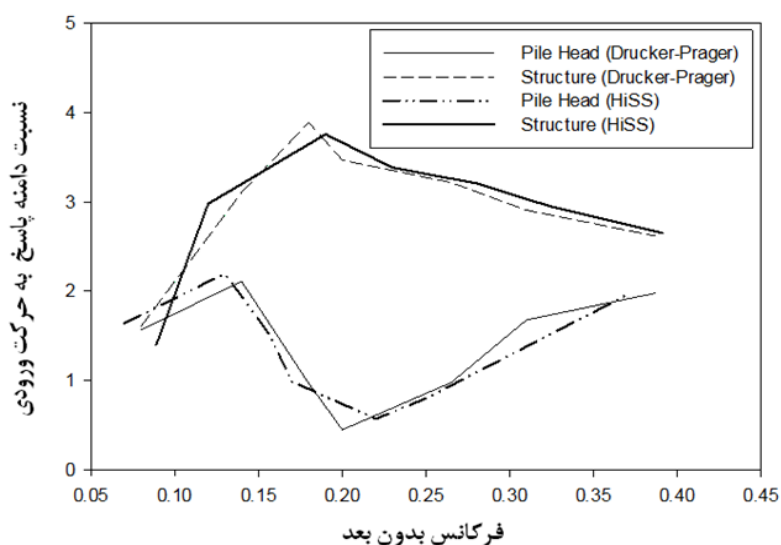
مش‌بندی مدل‌ها بایستی به‌گونه‌ای صورت می‌گرفت تا از انعکاس امواج لرزه‌ای به داخل مدل جلوگیری شود. این کار مستلزم افزایش اندازه‌ی مدل اجزای محدود با توجه به وجود میرایی در خاک می‌باشد. اما محدودیت موجود از نظر زمان محاسبات، موجب می‌شود تا ایده‌ی استفاده از مرزهای گذرا در کناره‌های مدل مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، مش اجزای محدود در کناره‌ها درشت و در نزدیکی مدل گروه شمع ریز انتخاب شد. المان‌های مورد استفاده در همه‌ی مدل‌ها از نوع شش‌وجهی هشت‌گره‌ی انتخاب شدند که در میانه‌های مدل از نوع محدود و در مرزهای جانبی نامحدود بودند.

در ضمن جدایش بین خاک و شمع در مدل‌سازی در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی مرزهای جانبی به‌صورت نامحدود صورت گرفته است. گروه‌های شمع با آرایش‌های مربعی ۲×۲ و ۳×۳ در خاک ماسه‌ای مترام قرار گرفته و تحت بارگذاری دینامیکی بررسی شده‌اند.

روند مدل‌سازی

مدل‌سازی عددی مطالعه‌ی حاضر ابتدا برای گروه شمع ۲×۲ مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. این کار با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر با مطالعه‌ی Maheshwari et al. (2004) با در نظر داشتن این نکته که مدل رفتاری خاک و نحوه‌ی مدل‌سازی مرزها متفاوت می‌باشند، انجام گردیده است شکل (۱) [11]. هدف Maheshwari et al. (2004) به دست آوردن تغییرات نسبت دامنه‌ی پاسخ در سطح زمین به دامنه‌ی حرکت ورودی در سنگ بستر با فرکانس بدون بعد بود. مدل‌سازی مرزها با استفاده از المان‌های کلوین صورت‌گرفته و مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک مدل HiSS بوده است. فرکانس بدون بعد به‌صورت نسبت حاصل ضرب فرکانس زاویه‌ای و قطر شمع به سرعت موج برشی در محیط تعریف می‌شود. مرزها در مطالعه‌ی حاضر از نوع نامحدود است و مدل رفتاری دراکر-پراگر برای خاک در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی‌ها شمع‌ها دارای سطح مقطع مربع با بعد ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ متراند و فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها ۲/۵ متر می‌باشد. با وجود این تفاوت‌ها در مدل‌سازی، اختلاف جواب‌های به دست آمده در حد قابل قبولی می‌باشد.

پس از اعتماد از صحت مدل عددی توسعه داده شده، گستره‌ی خاک در هر امتداد برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شد. گروه‌های شمع مورد بررسی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس متفاوت قرار گرفتند. در مطالعه‌ی اثر نسبت طول به قطر شمع بر



شکل ۱ مقایسه‌ی نتایج مربوط به صحت‌سنجی مدل حاضر با نتایج حاصل از تحقیق [11] Maheshwari et al. (2004)

جدول ۱ خصوصیات مصالح خاک، شمع و سازه در مطالعه‌ی حاضر

جزء مدل	جنس مصالح	خصوصیات مصالح
خاک	ماسه	$E=80 \text{ MPa}$, $\nu=0.35$, $\rho=1900 \text{ kg/m}^3$, $\phi=35^\circ$, $\psi=5^\circ$
شمع	بتن	$E=21 \text{ GPa}$, $\nu=0.20$, $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$
سازه	مجازی	$\rho=50000 \text{ kg/m}^3$

سینماتیکی برای گره‌های سطوح در مجاورت یک دیگر ایجاد می‌کند، به کار گرفته شد. رفتار تماسی در جهت نرمال بین سطوح از نوع "سخت" با قابلیت اجازه جدا شدن سطوح چسبیده به هم در صورت تجاوز از مقادیر آستانه در نظر گرفته شد.

یک جرم دارای حجم واحد که بار ۵۰۰ کیلو نیوتن را به سرشمع اعمال می‌نمود، برای مدل کردن سازه در مطالعه‌ی مربوط به اندرکنش وابسته به اینرسی در نظر گرفته شد. با توجه به پلاستیسیته‌ی کم به وجود آمده در توده‌ی خاک، قانون رفتاری از نوع دراگر-پراگر انتخاب گردید تا نتایج واقع‌گرایانه‌ای به دست آید. جدول (۱) خصوصیات مصالح خاک، شمع و سازه‌ی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

در همه‌ی تحلیل‌ها جدایش بین شمع و خاک در نظر گرفته شده است و قانون اصطکاک کولمب برای مدل کردن سطح تماس شمع‌ها و خاک به کار گرفته شد. برای مدل‌سازی سطوح تماس از گزینه‌ی اندرکنش تماسی سطح به سطح استفاده شد که تماس بین سطح شکل‌پذیر (خاک) و سطح صلب (شمع بتنی) را امکان‌پذیر می‌سازد. گره‌های سطح صلب در محاسبات قادر به نفوذ به گره‌های سطح شکل‌پذیر می‌باشند، اما عکس این حالت امکان‌پذیر نیست. پس از معرفی سطوح در تماس با هم و وضعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر، نحوه‌ی لغزش سطوح بر هم به صورت لغزش‌های کوچک تعریف شد. برای تعریف خصوصیات مکانیکی اندرکنش تماسی، الگوریتم تماسی پناغی که قید کم‌تری نسبت به الگوریتم تماسی

شرایط مرزی

مدل سازی شرایط مرزی در کناره های مدل به صورت کاملاً گذرا انجام شد تا از برگشت امواج لرزه ای به داخل مدل و اثر جعبه ای جلوگیری شود. این کار با استفاده از اجزای نامحدود صورت گرفت. این نوع مرز موج های لرزه ای منتشر را با فرض رفتار الاستیک خطی محیط مجاور خود به طور کامل به بیرون انتقال می دهد و از اثرات نامطلوب امواج بازتابی بر نتایج تحلیل عددی جلوگیری می کند. در عین حال، المان های موجود در داخل بدنه ی خاک از نوع المان های محدود که در آن ها انتشار موج سبب ایجاد تنش ها و تغییر شکل ها و انتقال آن ها به المان های مجاور می گردد، در نظر گرفته شدند. این نوع المان ها از نوع شش وجهی هشت گرهی که در تحلیل های ژئوتکنیکی دقت قابل قبولی ارائه می دهند، انتخاب گردیدند. در بستر سنگی نیز از المان های کلونین برای مدل سازی مرزهای نیمه گذرا استفاده شد. المان های کلونین به دو گونه فنر و میراگر می باشند که فنر سختی موجود مربوط به محیط خاکی و میراگرها نیز میرایی محیط را تأمین می کنند. شکل (۲) نمونه ای از مدل های ساخته شده و شرایط مرزی به کار گرفته شده در آن ها را نشان

می دهد.

مقادیر ثوابت المان های کلونین با استفاده از روش ارائه شده به وسیله ی Novak and Mitwally به صورت ذیل محاسبه می شوند [19]:

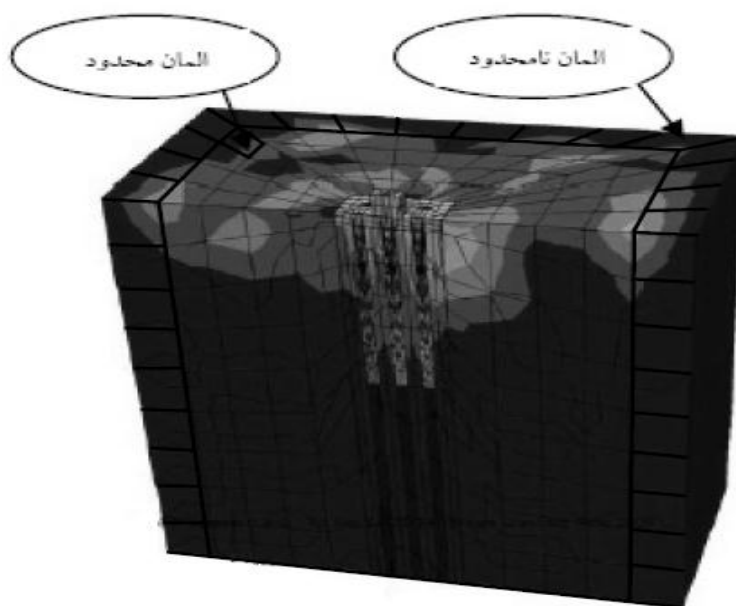
$$k_r^* = \frac{G}{r_0} [S_1(a_r, v, D) + i S_2(a_r, v, D)] \quad (1)$$

که در آن k_r^* سختی کل، G مدول برشی خاک، r_0 فاصله تا مرز المان محدود، S_1 و S_2 پارامترهای بدون بعد از راه حل های تحلیلی، v نسبت پواسون، i واحد مجازی $\sqrt{-1}$ ، a_r فرکانس بی بعد برابر با $\frac{r_0 \omega}{v_s}$ که در آن ω فرکانس زاویه ای بارگذاری و v_s سرعت موج برشی در خاک است. قسمت های حقیقی و مجازی معادله به ترتیب سختی و میرایی را نشان می دهند که برابر با:

$$K = \frac{GS_1}{r_0}$$

$$C = \frac{GS_2}{\omega r_0}$$

می باشند.



شکل ۲ یک نمونه از مدل خاک- گروه شمع ساخته شده برای تحلیل اندرکنش وابسته به اینرسی

بارگذاری

مقدار تغییر مکان‌های سرشمع ناشی از بارگذاری در بستر (پس از تحلیل‌های مربوط به اندرکنش سینماتیک توسط نرم‌افزار) می‌توانند به‌عنوان ورودی در تحلیل اندرکنش وابسته به اینرسی مورد استفاده قرار گیرند. جدول (۲) مقادیر بارهای انتخابی برای بارگذاری‌های تناوبی را نشان می‌دهد.

مقادیر بارهای وارد به سیستم به گونه‌ای انتخاب شدند تا خاک مورد بررسی در اطراف سرشمع وارد محدوده‌ی رفتار خمیری شود. این کار با تحلیل استاتیکی سیستم خاک-شمع با توجه به بار در نظر گرفته شده و به‌دست آوردن نمودارهای مربوط به کرنش خمیری در خاک با توجه به نمو بار استاتیکی تا کامل شدن آن صورت گرفت.

محاسبه تابع انتقال

تابع انتقال وابسته به فرکانس مطابق رابطه‌ی شماره (۲) محاسبه می‌شود:

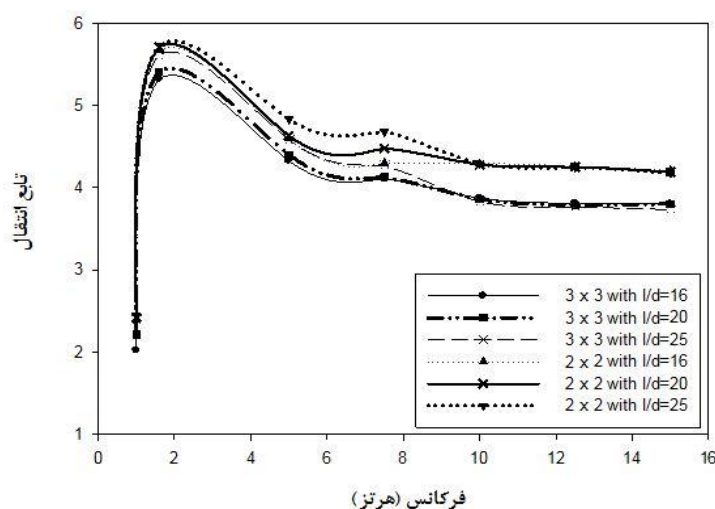
$$TF(f) = \frac{|U_p(f)|}{|U_{ff}(f)|} \quad (2)$$

که در آن $|U_p(f)|$ بیش‌ترین پاسخ جانبی در سرشمع و $|U_{ff}(f)|$ پاسخ میدان آزاد در فرکانس ارتعاشی متناظر با آن f می‌باشد. تحلیل‌ها برای بارگذاری‌های ذکر شده در قسمت قبل در هر مورد انجام شدند و نتایج به‌دست آمده مربوط به مطالعات اول و دوم به ترتیب در اشکال (۴ و ۳) ارائه شده‌اند.

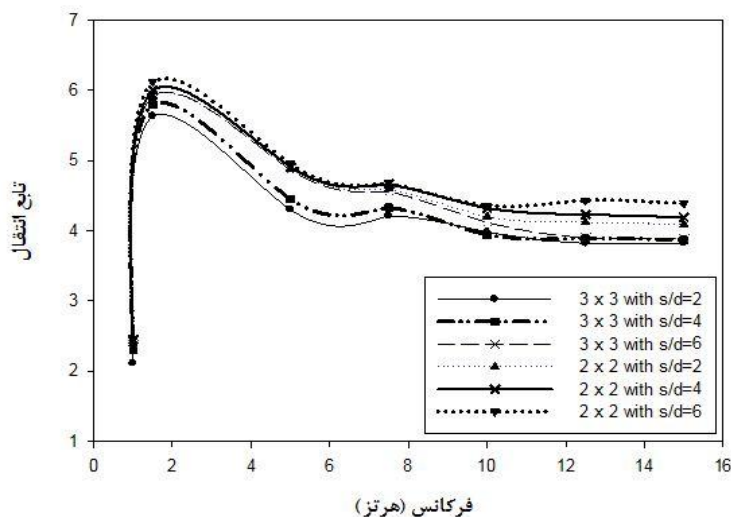
در کلیه‌ی تحلیل‌های مربوط به مطالعه اول بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس‌های ارتعاشی ۱/۶، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ هرتز و با دامنه‌ی بارگذاری ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلونیوتن برای گروه شمع چهارتایی (۲×۲) و ۲۸۰ و ۳۶۰ کیلونیوتن برای گروه شمع نه تایی (۳×۳) به سیستم‌ها اعمال گردیدند. با توجه به خصوصیات سیستم‌های مورد بررسی، مقدار فرکانس طبیعی متناظر با مد اول سیستم‌ها در حدود ۱/۶ هرتز بود. از آن‌جا که در تحلیل‌های مربوط به مطالعه دوم، مقدار فرکانس طبیعی متناظر با مد اول سیستم‌ها تقریباً برابر با ۱/۵۶ هرتز به‌دست آمد، بارگذاری‌های لرزه‌ای تناوبی با فرکانس‌های ارتعاشی ۱/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ هرتز برای مطالعه‌ی دوم در نظر گرفته شدند. در بارگذاری‌های تناوبی اعمال شده، بارگذاری سیستم تا رسیدن سیستم به‌حالت پاسخ یکنواخت ادامه یافت و لذا زمان تحلیل‌ها به تناسب فرکانس بارگذاری به گونه‌ای انتخاب شد تا از طرفی تحلیل‌ها از نظر محاسباتی مقرون به‌صرفه باشند و از سویی دیگر از رسیدن به حالت پاسخ یکنواخت در سیستم یقین حاصل شود. در بررسی اندرکنش سینماتیک، بارگذاری‌ها به کف مدل و در اندرکنش وابسته به اینرسی بارگذاری‌ها به سرشمع‌ها اعمال گردیدند. مقادیر خروجی از نرم‌افزار به‌صورت تغییر مکان در سرشمع در هر ۰/۱ ثانیه ثبت شدند.

جدول ۲ مقادیر بار انتخابی برای بارگذاری‌های تناوبی مورد مطالعه‌ی حاضر

بار اعمال شده به هر آرایش گروه شمع بر حسب کیلو نیوتن		نوع تحلیل
نه تایی (۳×۳)	چهارتایی (۲×۲)	
۲۸۰	۱۸۰	اندرکنش سینماتیک
۳۶۰	۲۴۰	اندرکنش وابسته به اینرسی



شکل ۳ مقایسه‌ی تغییرات تایع انتقال با فرکانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ با توجه به نسبت‌های طول به قطر متفاوت



شکل ۴ مقایسه‌ی تغییرات تایع انتقال با فرکانس برای گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ با توجه به نسبت‌های فاصله به قطر متفاوت

خاک- شمع در فرکانس‌های بالاتر و نزدیکی رفتار سیستم‌های دارای سختی متفاوت با هم توضیح داده شود. در مطالعه‌ی دوم توابع انتقال به دست آمده در گروه‌های شمع ۲×۲ به طور کلی دارای مقادیر بالاتری نسبت به گروه‌های شمع ۳×۳ می‌باشند. این مسأله می‌تواند به سختی کم‌تر این سیستم‌ها در مقایسه با گروه‌های دارای تعداد شمع بیش‌تر نسبت داده شود. در ضمن افزایش مقدار تایع انتقال در فرکانس حدود ۱/۵ هرتز می‌تواند به اثر تشدید مربوط به نزدیکی فرکانس ارتعاش در این محدوده به فرکانس طبیعی مد اول

این اشکال نشان می‌دهند که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر یعنی سیستم‌های دارای نسبت طول به قطر بزرگ‌تر و یا نسبت فاصله بین شمع‌ها به قطر بزرگ‌تر، اثر اندرکنش سینماتیک که در قالب توابع انتقال بررسی می‌شود، به صورت افزایش مقدار تغییر مکان‌های سرشمع نسبت به سیستم‌های سخت‌تر خود را نشان می‌دهد. این مسأله در فرکانس‌های ارتعاشی بالاتر و نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم‌های دارای سختی بیش‌تر، به گونه‌ای محدودتر خود را نشان می‌دهد. این نتیجه می‌تواند به ارتعاش بیش‌تر سیستم

ذکر شده می‌باشند. می‌توان ملاحظه نمود که اثر افزایش نسبت طول به قطر و یا فاصله به قطر شمع‌ها به صورت کاهش قسمت حقیقی تابع امپدانس می‌باشد. این مسأله می‌تواند به دلیل کاهش سختی در سیستم در اثر افزایش طول شمع‌ها و یا افزایش فاصله‌ی شمع‌ها باشد. کاهش ناگهانی مقدار حقیقی تابع امپدانس در برخی از فرکانس‌های ارتعاشی می‌تواند به دلیل افزایش ارتعاش در فرکانس‌های موردنظر به دلیل تقارن با فرکانس‌های طبیعی سیستم خاک - شمع باشد.

سیستم‌های دارای تعداد شمع بیش‌تر و یا نسبت فاصله به قطر کم‌تر، سختی بیش‌تری را از خود نشان می‌دهند. این مسأله را می‌توان با توجه به مقادیر بالاتر قسمت حقیقی تابع امپدانس مربوط به این سیستم‌ها در نمودارها مشاهده نمود. علاوه بر این، مقدار کاهش بیش‌تر سختی در نزدیکی برخی از فرکانس‌ها را می‌توان به ارتعاش بیش‌تر سیستم در آن محدوده‌ها به دلیل وجود فرکانس‌های طبیعی متفاوت سیستم در مدهای ارتعاشی مختلف نسبت داد. از آن‌جا که میزان کرنش پلاستیک در مطالعه‌ی حاضر به صورت محدود (آستانه‌ی ایجاد کرنش پلاستیک در بارگذاری استاتیکی مربوط به خروجی نرم‌افزار) در نظر گرفته شده است، میرایی ویسکوز می‌تواند نمایانگر میرایی در سیستم باشد.

بخش عمده‌ی میرایی در این حالت مربوط به میرایی تشعشعی است. این‌گونه میرایی در نتیجه‌ی وجود سختی متفاوت دو سیستم در حال ارتعاش در مجاورت یکدیگر می‌باشد. از خصوصیات این میرایی، وابستگی آن به مقدار تماس سطوح در مجاورت یکدیگر است، به گونه‌ای که مقدار این میرایی با میزان سطوح در تماس با یکدیگر رابطه‌ی مستقیم دارد. از آن‌جا که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر جدایش بیش‌تری بین شمع و خاک روی می‌دهد، می‌توان انتظار داشت که میزان میرایی در این سیستم‌ها دارای مقدار کم‌تری باشد. اما همان‌گونه که در شکل (۷) می‌توان مشاهده کرد این میزان در سیستم‌های دارای سختی

سیستم ربط داده شود. در کلیه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته مقدار بارگذاری در کف مدل به گونه‌ای در سطح آن توزیع شد تا مقدار بار تناوبی موردنظر که به سیستم اعمال می‌شود، حاصل گردد. لازم به ذکر است که مقادیر توابع انتقال به دست آمده با توجه به نوع بارگذاری لرزه‌ای می‌توانند تغییر نمایند و صرفاً زمان بارگذاری لرزه‌ای در این مورد تعیین‌کننده نیست.

محاسبه تابع امپدانس

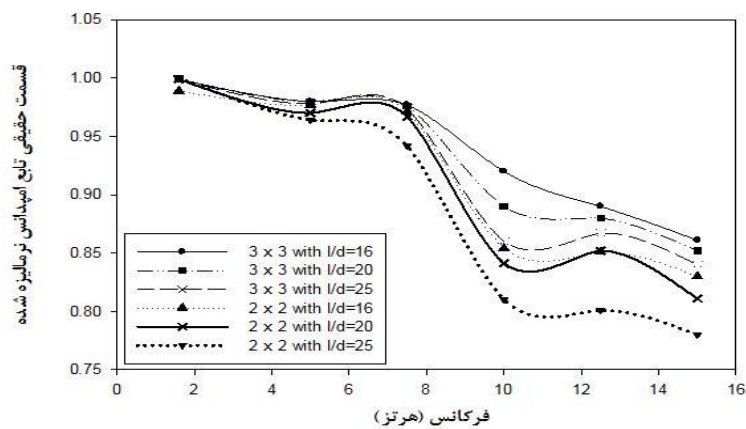
تابع امپدانس (IF) یک سیستم خاک - شمع به وسیله‌ی سختی و میرایی سیستم معرفی می‌گردد و تابعی از فرکانس ارتعاش (فرکانس تابع بارگذاری) و مقدار نیروی محرک می‌باشد. سختی دینامیکی مختلط K_c در فضای فرکانسی می‌تواند با به کار بردن یک بارگذاری حقیقی با دامنه‌ی مشخص P_0 در سرشمع و در نظر گرفتن دامنه‌ی پاسخ مختلط U_c در فرکانس‌های ارتعاشی مختلف سنجیده شود. هنگامی که پاسخ به حالت یکنواخت می‌رسد، ماکزیمم مقدار دامنه‌ی پاسخ U_0 و تأخیر زمانی متناظر با آن t_1 با توجه به دامنه‌ی نیروی به کار رفته از نمودار تغییر مکان - تاریخچه‌ی زمانی در سرشمع اندازه‌گیری می‌شوند. با این مشاهدات، تأخیر فاز θ (برحسب رادیان) و سختی دینامیکی مختلط سیستم خاک - شمع به صورت زیر می‌تواند به دست آید:

$$\theta = \omega t_1 = 2\pi f t_1$$

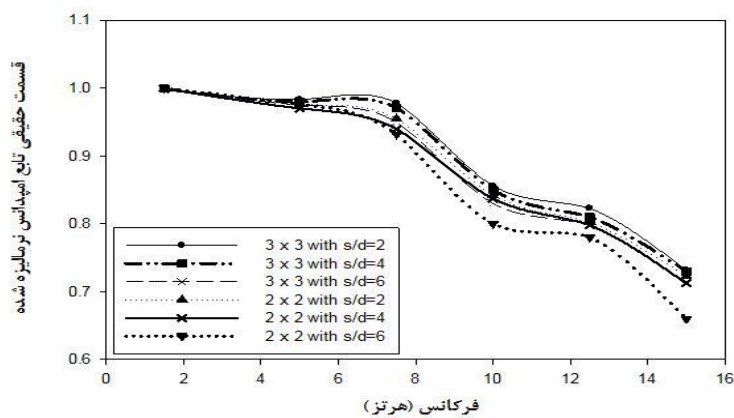
$$K_c = \left(\frac{P_0}{U_0} \right) e^{i\theta} \quad (13)$$

که در آن f فرکانس ارتعاش به هر تزی می‌باشد. با جداسازی سختی دینامیکی داده شده به وسیله‌ی معادله بالا به قسمت‌های حقیقی و مجازی، ثابت فنر (شامل اثر اینرسی) و ثابت میرایی می‌تواند به دست آید. شکل‌های (۶ و ۵) تغییرات قسمت حقیقی تابع امپدانس را با فرکانس ارتعاش در گروه‌های شمع متفاوت به ترتیب مربوط به مطالعه‌ی اول و مطالعه‌ی دوم نشان می‌دهند. شکل‌های (۸ و ۷) نیز گویای تغییرات قسمت مجازی این توابع با فرکانس به ترتیب

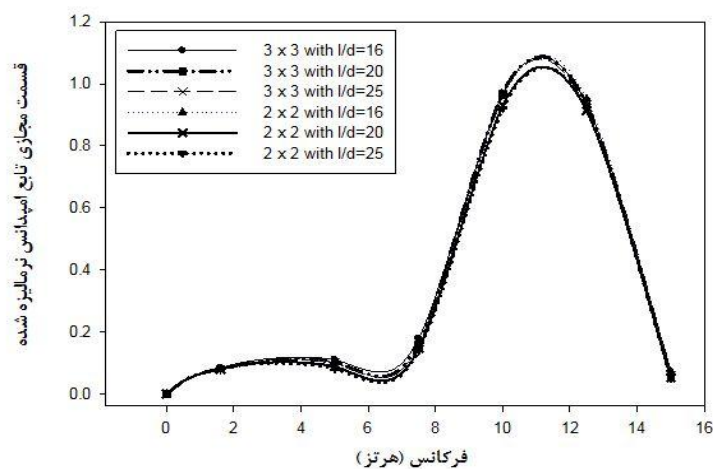
کم تر تفاوت زیادی را در مورد قسمت مجازی تابع نمی دهد. امیدانس با سیستم های شمع- خاک سخت تر نشان



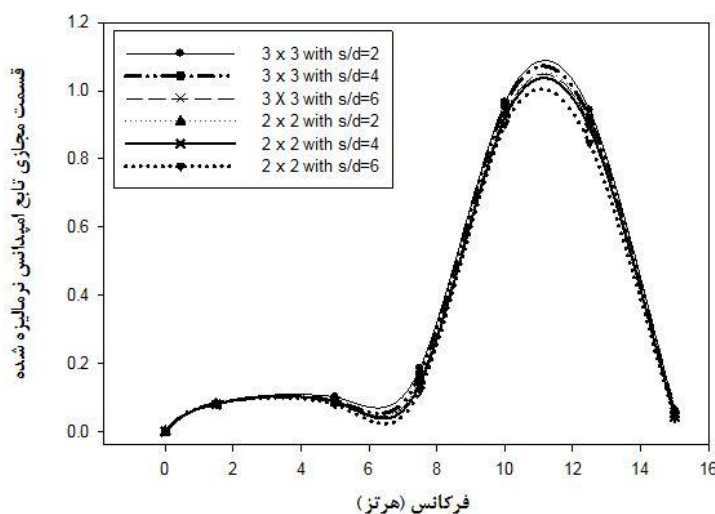
شکل ۵ تغییرات قسمت حقیقی تابع امیدانس برای گروه های شمع 2×2 و 3×3 با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت های طول به قطر متفاوت شمع ها



شکل ۶ تغییرات قسمت حقیقی تابع امیدانس برای گروه های شمع 2×2 و 3×3 با فرکانس ارتعاش و مقایسه مقادیر آن ها با توجه به نسبت های فاصله به قطر متفاوت



شکل ۷ تغییرات قسمت مجازی تابع امیدانس برای گروه های شمع 2×2 و 3×3 با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت های طول به قطر متفاوت شمع ها



شکل ۸ تغییرات قسمت مجازی تابع امپدانس برای گروه‌های شمع ۳×۳ و ۲×۲ با فرکانس ارتعاش با توجه به نسبت‌های فاصله به قطر متفاوت

با خاک اطراف می‌باشد و بنابراین قسمت بیش‌تری از انرژی موج لرزه‌ای از طریق تماس بین بدنه‌ی شمع و خاک منتقل و میرا می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر پارامترهای نسبت طول شمع‌ها به قطر آن‌ها و اثر نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع چهارتایی (۲×۲) و نه تایی (۳×۳) بر اندرکنش خاک-شمع-سازه (اندرکنش‌های سینماتیک و وابسته به اینرسی با مشاهده‌ی تغییرات توابع انتقال و امپدانس) مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی در مطالعه‌ی اول برای سه نسبت متفاوت طول به قطر در مطالعه‌ی دوم برای سه نسبت متفاوت فاصله به قطر در گروه شمع در فضای فرکانسی به صورت تحلیل‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت و نتایج زیر به دست آمد:

۱- با افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها در گروه‌های شمع متفاوت، مقدار توابع انتقال نیز افزایش پیدا می‌کنند. دلیل این مسأله می‌تواند کاهش سختی سیستم و بنابراین افزایش تغییر مکان قابل مشاهده در سرشمع‌ها باشد. با افزایش نسبت فاصله به

دلیل این مسأله می‌تواند این باشد که در سیستم‌های نرم‌تر، افزایش طول شمع‌ها منجر به ایجاد سطح تماس بیش‌تر با خاک اطراف می‌گردد و بنابراین اگرچه اثر افزایش طول شمع‌ها کاهش سختی در سیستم و در نتیجه کاهش میرایی به دلیل افزایش جدایش بین شمع و خاک است، اما افزایش سطح تماس خاک و شمع اثر معکوس بر کاهش میرایی و تفاوت در میزان قسمت مجازی تابع امپدانس در گروه‌های شمع با سختی متفاوت را محدود نموده است. شکل (۸) نیز همانند موارد مربوط به مطالعه‌ی اول به میرایی کم‌تر سیستم‌های دارای سختی پایین‌تر به دلیل ارتعاش هماهنگ بیش‌تر همراه با خاک اطراف و نیز اثر جدایش بین شمع و خاک بر مقدار میرایی اشاره دارد. از آن‌جا که در سیستم‌های دارای سختی کم‌تر، هماهنگی حرکت با خاک اطراف بیش‌تر می‌باشد، از میزان میرایی نسبت به سیستم‌های سخت‌تر کاسته می‌گردد. علاوه بر این، به دلیل وجود حرکت بیش‌تر در این سیستم‌ها اثر جدایش بین بدنه‌ی شمع و خاک مشهودتر می‌باشد و در نتیجه از میرایی تشعشعی بین بدنه‌ی شمع و خاک کاسته می‌گردد. این در حالی است که سیستم‌های سخت‌تر دارای جدایش کم‌تری

خود را نشان می‌دهد. این مسأله در واقع بدان معنی است که افزایش این نسبت منجر به کاهش سختی سیستم می‌گردد. اثر این کاهش را در فرکانس‌های خاصی که وابسته به مشخصات سیستم مرکب متشکل از خاک و شمع و سازه می‌باشند، بیش‌تر می‌توان دید.

۴- اثر افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها به صورت کاهش قسمت مجازی در این‌گونه سیستم‌ها خود را نشان می‌دهد که گویای کاهش میرایی در سیستم است.

این مسأله می‌تواند به افزایش جدایش بین شمع و خاک در گروه‌های شمع دارای نسبت طول به قطر بیشتر و در واقع سختی کم‌تر مربوط باشد که منجر به کاهش میرایی تشعشعی در سیستم می‌گردد. با این حال بایستی توجه داشت که با افزایش طول شمع‌ها، سطح تماس خاک و شمع نیز افزایش می‌یابد و بنابراین میرایی تشعشعی در سیستم که وابسته به سطح تماس دو جسم می‌باشد، افزایش می‌یابد. برآیند این دو اثر منجر به تفاوت اندک مقدار مجازی تابع امیدانس در سیستم‌های خاک-شمع متفاوت می‌گردد. با افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها قسمت مجازی توابع امیدانس نسبت به مقادیر مربوط به حالت‌های دارای فواصل کم‌تر شمع‌ها دچار کاهش می‌شوند. این مسأله نیز همانند مطالعه اول به دلیل اثر این تغییر بر سختی سیستم (کاهش آن) می‌باشد که منجر به تغییر مکان‌های بیش‌تر گروه شمع به خصوص در سرشمع می‌گردد. متعاقب آن، جدایش بیش‌تر بین شمع و خاک در سیستم‌های نرم‌تر و در واقع تماس کم‌تر بدنه شمع و خاک منجر به کاهش میرایی تشعشعی در سیستم می‌گردد که به صورت کاهش قسمت مجازی تابع امیدانس خود را نشان می‌دهد.

قطر شمع‌ها می‌توان مشاهده نمود که مقدار توابع انتقال نیز متناظر با این تغییر افزایش می‌یابند. این مسأله می‌تواند به کاهش انسجام سیستم گروه شمع در نتیجه افزایش فاصله‌ی بین شمع‌ها و در واقع کاهش راندمان مربوط به عملکرد گروهی آن‌ها نسبت داده شود. به عبارت دیگر، سیستم به صورت غیرمنسجم و با مقاومت خمشی کمتر منتج از عمل‌کرد ناهماهنگ شمع‌ها در گروه شمع در برابر بار وارده مقاومت نموده و نسبت تغییر مکان‌های سرشمع به میدان آزاد افزایش می‌یابند. کاهش یکپارچگی مقاومتی سیستم در برابر نیروهای جانبی و تغییر مکان‌های بیش‌تر در سرشمع، افزایش توابع انتقال را به دنبال دارد. این مسأله مانند آن است که سیستم، سختی خمشی کم‌تری را نسبت به حالت گروه شمع مشابه با راندمان بالاتر داراست. علاوه بر این می‌توان مشاهده نمود که افزایش تعداد شمع‌ها در گروه باعث کاهش تغییر مکان سرشمع و در نتیجه کاهش توابع انتقال می‌گردد.

۲- افزایش مقدار فرکانس ارتعاش در گروه‌های شمع دارای سختی پایین‌تر منجر به نزدیکی بیش‌تر مقادیر توابع انتقال در این گروه شمع‌ها به توابع انتقال مربوط به گروه‌های سخت‌تر می‌گردد. این مسأله می‌تواند به دلیل ارتعاش بالاتر در این فرکانس‌ها و تقارن با فرکانس طبیعی در سیستم‌های سخت باشد.

۳- افزایش نسبت طول به قطر شمع‌ها منجر به کاهش قسمت حقیقی تابع امیدانس گردید که بیانگر کاهش سختی سیستم خاک-شمع است. در بررسی اندرکنش وابسته به اینرسی در مطالعه دوم نیز اثر افزایش نسبت فاصله به قطر شمع‌ها به صورت کاهش قسمت حقیقی توابع امیدانس

مراجع

1. Balendra, S., "Numerical Modeling of Dynamic Soil-Pile-Structure Interaction", M.Sc. Thesis, Washington State University, (2005).
2. Goodson, M. W. and Anderson, J. B., "Soil-Structure Interaction-a Case Study", *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York, (2005)
3. Nogami, T. and Konagai, K., "Time domain axial response of dynamically loaded single piles", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 112 (11), pp. 1241-1252, (1986).
4. Nogami, T. and Konagai, K., "Time domain flexural response of dynamically loaded single piles", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114 (9), pp. 1512-1525, (1988).
5. El Naggar, M. H. and Novak, M., "Nonlinear lateral interaction in pile dynamics", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14, pp. 141-157, (1995).
6. El Naggar, M. H. and Novak, M., "Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, pp. 233-244, (1996).
7. Wu, G. and Finn, W. D. L., "Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain", *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp. 44-52, (1997).
8. Bentley, K. J. and El Naggar, M. H., "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 37, pp. 1368-1382, (2000).
9. Penzien, J., *"Soil-Pile Foundation Interaction"*, Earthquake Engineering, Chapter 14, Prentice- Hall, pp. 349-381, (1970).
10. Cai, Y. X., Gould, P. L. and Desai, C. S., "Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure system and application", *Engineering Structures*, 22 (2), pp. 191-199, (2000).
11. Maheshwari, B. K., Truman, K. Z., Gould, P. L. and El-Naggar, M. H., "Three dimensional nonlinear dynamic behavior of pile groups using finite element method in the time domain", *Canadian Geotechnical Journal*, 41, pp. 118-133, (2003).
12. Poulos, H. G., "Analysis of the Settlement of Pile groups", *Géotechnique*, 18 (4), pp. 449-471, (1968).
13. Poulos, H. G., "Behavior of Laterally Loaded piles, II: Pile Groups", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 97 (SM5), pp. 773-751, (1971).
14. Butterfield, R. and Banerjee, P. K., "The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups", *Géotechnique*, 21, pp. 43-60, (1971).
15. Kausel, E. and Peek, R., "Boundary integral method for Stratified Soils", Res. Re, R82-50, MIT, Cambridge, MA, (1982).
16. Kaynia, A. M. and Kausel, E., "Dynamic behavior of pile groups", *Proc. of the 2nd int. conference on numerical methods in offshore piling*, Texas University, Austin, pp. 509-532, (1982).

17. Sen, R., Davies, T. G. and Banerjee, P. K., "Dynamic Analysis of Piles and Pile Groups Embedded in Homogeneous Soils", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, pp. 53-65, (1985).
18. Ahmad, S. and Mamoon, S. M., "Seismic Response of Floating Piles to Obliquely Incident Waves", *Proc. of the 2nd int. conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, St. Louis, MO., University of Missouri-Rolla Publication, pp. 805-814, (1991).
19. Novak, M. and Mitwally, H., "Transmitting boundary for axisymmetrical dilation problems", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114 (1), pp. 181-187, (1988).

Archive of SID