

مدلسازی عددی سه بعدی پاسخ لرزه‌ای پی - شمع در ماسه اشباع به منظور بررسی آثار ساختگاهی

مژگان فلاح‌زاده^۱، یاسر جعفریان^{۲*}، عبدالحسین حداد^۳

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،

۲- دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،

yjafarianm@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش [۱۳۹۶/۱۱/۲۸]

تاریخ دریافت [۱۳۹۶/۵/۱۰]

چکیده

یکی از مهم‌ترین مباحث ژئوتکنیک لرزه‌ای مسئله اثرات محلی ساختگاه است که در مناطق پوشیده از خاک‌های مستعد روانگرایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از راه‌های کاهش خرابی سازه‌ها در این مناطق، استفاده از پی‌های عمیق متکی بر لایه محکم است. در چنین مواردی به علت کمبود ظرفیت باربری سطحی از سیستم پی - شمع استفاده می‌شود. بزرگ‌نمایی امواج برای سازه متکی بر پی - شمع به علت اندرکنش‌های موجود بین این سیستم و خاک شرایط پیچیده‌ای داشته و وجود این سیستم می‌تواند بر مشخصات دامنه و محتوای فرکانسی موج تأثیر گذارد. چنین موضوعی در طراحی معمول سازه‌های متکی بر پی - شمع لحاظ نمی‌شود. در این تحقیق با استفاده از تحلیل سه‌بعدی همبسته دینامیکی در حوزه زمان، میزان تأثیر حضور پی - شمع بر بزرگ‌نمایی امواج بررسی شده و نتایج حاصل با نتایج شرایط میدان آزاد مقایسه شده است. بر اساس نتایج کلی حاصل از این پژوهش وجود ماسه اشباع و شرایط روانگرایی سبب کاهش ضریب بزرگ‌نمایی در شرایط میدان آزاد و همچنین ساختگاه با فونداسیون پی - شمع شده است. اما میزان کاهش ضریب بزرگ‌نمایی در فونداسیون پی - شمع در مقایسه با شرایط میدان آزاد کمتر است. همچنین افزایش سختی سیستم پی - شمع متکی بر لایه محکم و قوی‌تر شدن حرکت ورودی (افزایش دامنه و یا پرپود حرکت ورودی) سبب افزایش ضریب بزرگ‌نمایی سیستم پی - شمع شده است.

واژگان کلیدی: ماسه اشباع، پی - شمع، پاسخ لرزه‌ای، مدلسازی سه بعدی، اثرات محلی ساختگاه

۱ - مقدمه

با وجود آن‌که سال‌های نسبتاً زیادی از مشاهده خطرهای لرزه‌ای مختلف می‌گذرد، این پدیده‌ها نسبت به آثار زلزله روی سازه‌ها شناخته‌ترند [1]. یکی از این مخاطرات لرزه‌ای بنابر آمارهای موجود در زلزله‌های اخیر، پدیده روانگرایی است. این پدیده در دنیا با دو زلزله نیگاتا و آلاسکا در سال ۱۹۶۴ میلادی و در کشور ما با زلزله منجیل در سال ۱۳۶۹ شمسی به عنوان یک

با توجه به قرارگیری ایران در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای بالا، نیروهای ناشی از زلزله یکی از عوامل کنترل‌کننده طراحی در مهندسی عمران است. ماهیت و روش اعمال این نیروها به سازه‌ها موضوع شناخته‌شده‌ای است که در آیین‌نامه‌های مختلف در مورد آن‌ها توضیح داده شده است. در حوزه ژئوتکنیک،

تغییر شکل‌های جانبی ناشی از گسترش جانبی روانگرایی نشان دادند. ونگ و همکاران [10] تاثیرات کلاهدک شمع، گسترش جانبی و لایه سطحی غیرروانگرا بر پاسخ فونداسیون شمعی با استفاده از مدل عددی سه بعدی المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند وجود کلاهدک سبب کاهش چرخش شمع شده و همچنین ممان خمشی ایجاد شده در شمع با کلاهدک و بدون آن در جهت مخالف هم می‌باشند. گسترش جانبی سبب افزایش ممان خمشی در شمع می‌شود. دس و همکاران [11] منحنی $p-v$ برای مدلسازی شمع در خاک‌های روانگرا با استفاده از روش تیر روی فونداسیون غیرخطی وینکلر و تحلیل جانبی شمع‌ها منحنی بدست آوردند. همچنین از جمله مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در ایران روی رفتار شمع‌ها در خاک روانگرا می‌توان به پژوهش اسلامی [12-13] در زمینه ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌های مستقر در سازه‌های دریایی با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط و همچنین تأثیر بهسازی خاک‌های سواحل دریای خزر با استفاده از سیمان بر مقاومت برشی خاک اشاره کرد. علاوه بر این کارهای عددی بسیاری در مورد مطالعه آسیب پذیری و تأثیر روش‌های بهسازی روی دیوارهای ساحلی به عنوان نمونه میرایی [14] و اشرف ذکری [15] انجام شده است.

اما همان‌گونه که در توضیحات فوق مشاهده می‌شود، تمرکز پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با بررسی عددی رفتار دینامیکی و اندرکنش خاک روانگرا با شمع است که به منظور طراحی شمع و کاهش تغییر شکل‌های قائم و افقی انجام می‌شود. در واقع پژوهش‌های کمتری در مورد تأثیر بهسازی سطحی در خاک‌های با قابلیت روانگرایی بر مشخصات لرزه‌ای ساختگاه صورت گرفته است. به عنوان نمونه وقتی برای عبور از لایه روانگرا از پی-شمع استفاده شود، روانگرا شدن خاک در اثر زلزله، اندرکنش با شمع، رفتار سازه‌ای شمع و پی سطحی همگی می‌توانند دامنه و محتوای فرکانسی امواج لرزه‌ای در سطح زمین یا تراز فونداسیون را تغییر دهند. برخی از پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر بهسازی سطحی بر پاسخ ساختگاه در ادامه خلاصه شده‌اند. زاکیانگ و همکاران [16] دریافتند که افزایش مدول الاستیسیته شمع سبب کاهش PGA و PGD در داخل ناحیه بهسازی شده می‌شود. یانپینگ و همکاران [17] به تحلیل لرزه‌ای

خطر لرزه‌ای مهم شناخته شده است. توده وسیعی از خاک‌های سطحی موجود در مناطق ساحلی خلیج فارس و دریای خزر و فرا ساحلی و همچنین در مسیر رودهای بزرگ از نوع ماسه‌ای سست یا نیمه متراکم و یا از نوع سیلت‌های غیرچسبده هستند که در صورت قرارگیری در شرایط لرزه‌ای سختی خود را به شدت از دست می‌دهند. به همین علت در این نواحی گاهی اوقات سازه‌ها بر روی فونداسیون‌های شمعی ساخته می‌شوند تا نیروهای وارد شده از عهده خاک مستعد روانگرایی برداشته شوند. به عنوان نمونه بندر بوشهر یکی از بنادر بزرگ تجاری ایران و با موقعیت استراتژیک و همچنین مخازن نفتی و گازی بسیار است. خطر لرزه‌خیزی مناطق مذکور نیز با بروز زلزله‌های بسیار در سال‌های اخیر از جمله زلزله‌های رخ داده در شهرهای کاک، شنبه و بوشکان در استان بوشهر و خسارت‌های ناشی از آن‌ها اثبات شده است. به همین علت در این نواحی سازه‌ها معمولاً روی فونداسیون‌های شمعی ساخته می‌شوند [2].

مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای شمع‌ها در خاک روانگرا و یا پی سطحی مستقر بر خاک روانگرا، یکی از موضوعات اصلی پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌رود. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه تمرکز اصلی بر مدلسازی خاک روانگرا-شمع، بررسی پاسخ دینامیکی سیستم و رفتار شمع است تا به این وسیله تمهیدات لازم برای طراحی فونداسیون مناسب برای سازه لحاظ شود. به عنوان نمونه رحمانی و پاک [3] با یک مدل رفتاری مناسب برای خاک‌های روانگرا رفتار شمع در این خاک‌ها را بررسی کرده و اثر نفوذپذیری خاک و پارامترهای دیگری نظیر مشخصات امواج لرزه‌ای را بر رفتار مکانیکی شمع و تغییر شکل‌ها ارزیابی نمودند. برخی از کارهای عددی دیگر انجام شده برای مدلسازی رفتار شمع در خاک‌های روانگرا شامل فین و فوجیتا [4]، کلار و همکاران [5]، اوزوکا و همکاران [6]، چنگ و جرمیک [7]، کوموروموس و همکاران [8] و الگمل و همکاران [9] می‌باشند. چنگ و جرمیک [7] با استفاده از یک مدل رفتاری سطح مرزی برای ماسه اشباع، شش حالت مختلف را برای شبیه‌سازی رفتار ستون-شمع-خاک در زمین شیب‌دار، گسترش جانبی و نشست بررسی نمودند. الگمل و همکاران [9] با استفاده از مدلسازی عددی کاربرد ستون‌های سنگی و شمع را در کاهش

صورت ویژه در این باب وجود ندارد. در این پژوهش تأثیر فرکانس، PGA، حضور پی - شمع و سختی جانبی آن بر طیف پاسخ ساختگاه با استفاده از تحلیل سه بعدی همبسته دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به معرفی نرم افزار OpenSees پرداخته شده و سپس روند درستی آزمای مدل عددی با استفاده از آزمایش سنتریفیوژ ویلسون و همکاران [20] شرح داده شده است. پس از درستی آزمای مدل عددی، تأثیر حضور پی - شمع در خاک روانگرا و خشک مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه به بررسی تأثیر سختی جانبی، تغییر محتوای فرکانس و PGA حرکت ورودی با استفاده از بارهای هارمونیک بر رفتار پی - شمع در شرایط خاک روانگرا پرداخته شده و طیف پاسخ ساختگاه در حالت های مختلف با هم مقایسه شده اند. در نهایت طیف پاسخ ساختگاه سیستم پی - شمع و میدان آزاد در خاک روانگرا و خشک تحت اثر زلزله واقعی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مدل سازی عددی پی - شمع در خاک روانگرا و درستی آزمایی

۲-۱- معرفی برنامه OpenSees

در این پژوهش از برنامه اجزای محدود کد باز OpenSees¹ استفاده شده است که یک برنامه اجزای محدود جامع برای مدل سازی پاسخ لرزه ای سیستم های سازه ای و ژئوتکنیکی می باشد که توسط PEER² توسعه داده شد. OpenSees دارای محدوده وسیعی از المان های مختلف، الگوریتم هایی برای حل مسئله و همچنین مدل های رفتاری متنوع برای مصالح بوده و در نتیجه دارای قابلیت های پیشرفته ای برای مدل سازی دوبعدی و سه بعدی آنالیزهای دینامیکی همبسته محیط متخلخل اشباع و تحلیل پاسخ غیرخطی سیستم ها است [21-22].

۲-۲- معرفی آزمایش سنتریفیوژ ویلسون و همکاران (۱۹۹۸)

با توجه به پیچیدگی مدل سازی عددی سیستم خاک و گروه شمع به صورت سه بعدی، برای حصول اطمینان از درستی مدل سازی،

پی های مرکب پرداختند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش عمق تثبیت خاک PGA ناحیه تثبیت شده افزایش می یابد و مقدار حداکثر طیف پاسخ شتاب زمین در امتداد عمق بهسازی کاهش می یابد. گانگ و همکاران [18] با تغییر پارامترهای مدول الاستیسیته خاک طبیعی، مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده، خصوصیات موج لرزه ای، عرض و عمق ناحیه تثبیت شده، به بررسی اثر بهسازی بر پاسخ لرزه ای ساختگاه پرداختند. مطالعات آن ها نشان می دهد که تثبیت پی اثر قابل ملاحظه ای بر ویژگی های فرکانسی طیف پاسخ شتاب افقی ندارد، در حالی که PGA را به شدت کاهش می دهد. فلوروی و همکاران [19] به بررسی تأثیر بهسازی خاک با ستون سنگی بر پاسخ ساختگاه در حین زلزله پرداخته اند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که به دلیل بهسازی خاک ضریب بزرگنمایی ساختگاه تغییر کرده و می تواند سبب کاهش و یا افزایش بار لرزه ای وارد شده بر روسازه شود.

بنابر آیین نامه های طراحی به منظور طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، باید پارامترهای نسبت شتاب مبنای طرح و ضریب بازتاب ساختمان تعیین شوند. ضریب بازتاب ساختمان بیانگر نحوه پاسخ ساختمان به حرکت زمین با توجه به نوع آن بوده و برای تعیین آن باید ضریب شکل طیف و ضریب اصلاح طیف محاسبه شوند. ضریب شکل طیف با در نظر گرفتن بزرگنمایی خاک در پیوندهای مختلف و میزان لرزه خیزی منطقه مشخص می شود. در آیین نامه ها بطور کلی برای تعیین بزرگنمایی، پروفیل خاک به صورت میدان آزاد فرض شده است اما در ساختگاه هایی که عواملی موجب ناپایداری زمین می شود مانند وجود خاک روانگرا، باید با استفاده از مطالعات ژئوتکنیک، کنترل های مطرح شده برای کاهش خطرها در نظر گرفته شود. از جمله روش های پیشنهادی برای کاهش خطر استفاده از پی های عمیق است. نکته مهم دیگر که باید به آن توجه شود این است که توجه تنها به خاک های مسئله دار کافی نیست بلکه چگونگی بهسازی در این خاک ها نیز می تواند در پاسخ طیفی سازه تاثیرگذار باشد. هدف از این پژوهش بررسی رفتار لرزه ای گروه شمع در برابر پدیده روانگرایی یا تولید فشار آبی حفره ای اضافی و تأثیر آن بر طیف طرح ساختگاه می باشد. به لحاظ آیین نامه ای این موضوع در طراحی های متداول ساختمان های متکی بر پی - شمع در خاک لحاظ نمی شود و توصیه ای برای تغییر ضرایب بزرگنمایی به

1 Open System for earthquake Engineering Simulation

2 Pacific earthquake Engineering research center

۰/۵۲ متر است. وزن روسازه ۲۳۳ تن و ارتفاع ستون متصل کننده روسازه به فونداسیون ۱۰/۸۹ متر است.

۲-۳- جزئیات مدلسازی عددی

گام‌های مدلسازی عددی معمولاً شامل رسم بلوک کلی مدل و مش‌بندی، تعیین شرایط مرزی و تعیین مشخصات مصالح خاک و شمع است که در ادامه به طور خلاصه شرح داده می‌شوند. شبکه المان محدود به کار رفته شامل یک شبکه سه بعدی با المان‌های ۸ گرهی SSPBrickUP برای مدلسازی خاک اطراف شمع است. برای مدلسازی شمع از المان‌های Beam Column Element استفاده شده است. اندازه بلوک کلی و ضخامت لایه‌ها و همچنین ابعاد شمع و محل قرارگیری آن بر اساس مشخصات ستیریفیوژ تعیین شده است. در این پژوهش برای مدلسازی کلاهک از المان‌های حجمی StdBrick با سه درجه آزادی انتقالی استفاده شده و رفتار تمام شمع‌ها در مرحله بارگذاری به صورت الاستیک غیرخطی و با در نظر گرفتن اثر $p-\Delta$ است. در این مدلسازی جرم متمرکز در گره‌های المان شمع و المان ستون در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری مورد استفاده باید قادر به مدلسازی ویژگی‌های اصلی ماسه اشباع تحت بارگذاری زلزله در شرایط وجود تنش برشی اولیه و فشارهای همه جانبه در محدوده وسیعی از دانسیته نسبی باشد. پریوو [23] یک مدل رفتاری برای ماسه‌ها ارائه داده بود که در آن از یک سطح تسلیم چند صفحه‌ای برای شبیه‌سازی رفتار سبکی و رفت و برگشتی خاک استفاده شده است. این مدل رفتاری توسط الگمل [24] برای در نظر گرفتن تحرک سبکی اصلاح شده است و در مطالعه حاضر از آن استفاده شده است. مشخصات مکانیکی ماسه نوادا در جدول (۱) ارائه شده است.

برای مدلسازی المان فصل مشترک بین خاک و شمع از المان BeamContact3D استفاده شده است. این المان یک بعدی نقاط خاک را به المان beam متصل کرده و المان فصل مشترک اصطکاکی را بین beam و سایر نقاط برقرار می‌کند. اصول اولیه این المان توسط لارسن و ریگرز [26-27] بیان شده است. پارامترهای مکانیکی لازم برای مدلسازی این المان عبارتند از: ضریب اصطکاکی بین خاک و شمع، پارامتر سختی برشی،

نتایج عددی با نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی ویلسون و همکاران [20] مقایسه شد. داده‌های آزمایشگاهی ویلسون و همکاران [20]، مربوط به ۵ مدل فیزیکی ستیریفیوژ بوده که هر کدام از این مدل‌ها تحت ۱۷ شتابنگاشت مختلف قرار گرفته‌اند. به منظور درستی آزمایشی مدل عددی در این پژوهش تنها مدل آزمایشگاهی شماره ۲ مدنظر قرار گرفته شده است. شکل (۱) مدل آزمایشگاهی Csp2 را نشان می‌دهد که از دولایه خاک از جنس ماسه نوادا تشکیل شده است. لایه اول با تراکم ۳۵٪ و ارتفاع ۹/۱ متر (در مقیاس اصلی) و لایه دوم با تراکم ۸۰٪ و ارتفاع ۱۱/۴ متر (در مقیاس اصلی) است. توجه شود که کلیه ابعاد و پارامترهای مکانیکی خاک و سازه‌ها مانند طول، مساحت، ممان اینرسی، مدول یانگ، مدول برشی و غیره در این مقاله از این به بعد در مقیاس واقعی ارائه می‌شوند.

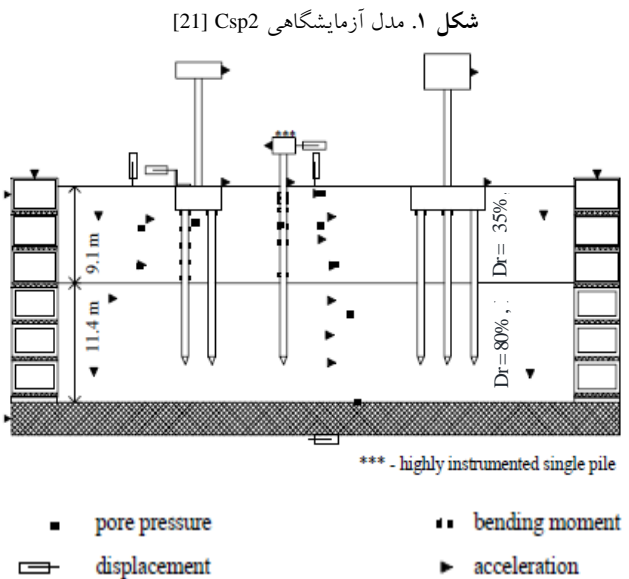


Fig. 1. Model layout of Csp2 [20]

همچنین نتایج ارائه شده نیز در مقیاس واقعی است. در این مدل، پی-شمع ۲×۲، پی-شمع ۳×۳ و یک شمع تکی قرار داده شده است. به منظور درستی آزمایشی مدل عددی، پی-شمع ۲×۲ همراه با روسازه در نظر گرفته شده است.

ابعاد فونداسیون مربعی پی-شمع برابر با $۴/۶ \times ۴/۶ \times ۲/۳$ متر بوده و فاصله مرکز شمع‌ها از گوشه فونداسیون ۱ متر می‌باشد. شمع‌ها از جنس آلومینیوم با چگالی ۲۹۰ ton/m^3 ، مدول یانگ ۷۰ GPa و بصورت لوله توخالی با قطر خارجی $۰/۶۷$ متر و قطر داخلی

موجود، مدل نهایی با ۱۱۲۰ المان مکعبی بطوری که ابعاد المان‌های نزدیک پی - شمع ۱ متر و المان‌های دورتر و مرزی ۲ متر است، در نظر گرفته شده است (شکل ۲). همان‌گونه که در بخش قبلی بیان شده است، به سیستم خاک و سازه Csp2، ۱۷ تاریخچه زمانی شتاب ورودی اعمال شده بود که در این پژوهش برای درستی آزمایشی مدل عددی از تاریخچه شتاب ورودی رخداد F (شتابنگاشت زلزله کوبه) با بیشینه شتاب ۰/۲۲g به مدل استفاده شده است. شکل (۳) تاریخچه شتاب ورودی Kobe را نشان می‌دهد.

شکل ۲. مدل مش‌بندی شده سه بعدی نهایی خاک، شمع و پی سطحی

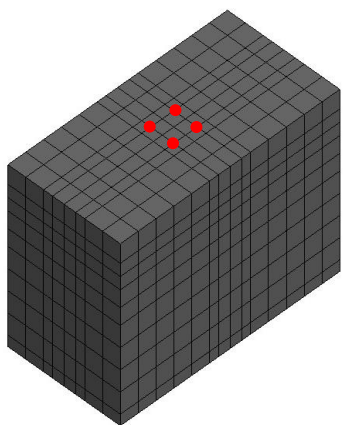


Fig. 2. 3-D mesh model of soil, pile, and raft

شکل ۳. تاریخچه شتاب ورودی کوبه با حداکثر شتاب ۰/۲۲g [20]

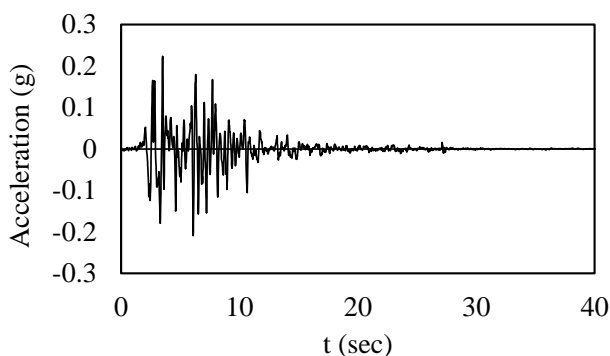


Fig. 3. The acceleration time-history of Kobe earthquake with peak acceleration of 0.22g [20]

۲-۴- نتایج درستی آزمایشی

در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج آزمایش ستریفیوژ و مدل‌سازی عددی پرداخته شده است. با توجه به اینکه مشاهده اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی شتاب در حوزه زمان دشوار است پاسخ شتابی به صورت طیفی مقایسه می‌شوند تا مقایسه بهتری

چسبندگی و مقاومت کششی المان فصل مشترک. به علت ماسه‌ای بودن خاک مورد مطالعه مقدار پارامترهای مقاومت کششی و چسبندگی برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. ضریب اصطکاک بین خاک و شمع بر اساس درجه بوده و در این پژوهش برابر با ۰/۶۷ زاویه اصطکاک داخلی خاک لحاظ شده است. پارامتر سختی برشی نیز بر اساس شیب منحنی p-y تعیین می‌شود.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی ماسه نوادا در دو تراکم ۳۵ درصد و ۸۵ درصد [25]

Parameter	Dr=80%	Dr=35%
Saturated soil mass density (kg/m ³)	2000	1900
Shear modulus (MPa)	100	31.36
Bulk modulus (MPa)	200	100
Friction angle (deg)	38	32.3
Peak shear strain (γ_{max})	0.1	0.1
Mean effective confining pressure (kPa)	80	80
PressDependCoe (d)	0.5	0.5
Phase transformation angle (deg)	28	26.5
Contraction constant (c)	0.07	0.17
dilat1	1	4
dilat2	30	30
liq1	5	10
liq2	0.005	0.015
liq3	3	3
Number of yield surfaces	20	20

Table. 1. Characteristics of Nevada sand in Dr = 35% and Dr = 85%

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای سیستم پی - شمع به صورت زیر است: برای مدل‌سازی جعبه انعطاف‌پذیر گره‌های موجود در اطراف مدل در یک تراز مشخص، جابه‌جایی یکسانی را در جهت x و y دارند. تغییر مکان مرزهای جانبی موازی با تحریک ورودی در جهت عمود بر جهت لرزش بسته است. همچنین مرز پایینی ثابت و بدون تغییر مکان در نظر گرفته شده است. برای تعیین فاصله مناسب مرزها برای تأثیر کمتر امواج برگشتی و تعیین ابعاد مناسب المان‌ها آنالیز حساسیت انجام شده است. با توجه به دقت پاسخ‌ها، زمان تحلیل و امکانات محاسباتی

همچنین به منظور بررسی تأثیر ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای بر پاسخ ساختگاه، طیف پاسخ میدان آزاد و سیستم پی-شمع در خاک روانگرا و خشک با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

برای انجام تحلیل‌های دینامیکی، انتخاب تنها یک و یا چند شتاب‌نگاشت برای تحلیل‌های تاریخچه زمانی برای یک ساختگاه با عدم قطعیت‌های زیادی همراه است. زیرا شتاب‌نگاشت‌های مختلف از نظر ثبت در نقاط گوناگون، شتاب بیشینه، محتوای فرکانسی، مدت دوام و ... با هم متفاوت است. در نتیجه باید تعداد رکوردهای زیادی را مورد تحلیل قرار داد که این امر سبب می‌شود انجام تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از رکوردهای واقعی زلزله بسیار زمانبر باشد. بر همین اساس برای انجام تحلیل‌های دینامیکی در این مرحله از بارهای هارمونیک استفاده شده است چرا که استفاده از بارهای هارمونیک برای اهدافی که در این بخش دنبال می‌شوند کفایت دارند.

در شکل (۶) چهار حالت میدان آزاد و سیستم پی-شمع در شرایط روانگرا و خاک خشک نشان داده شده است. شرایط ساختگاه و مشخصات فنی لایه‌های خاک مشابه آزمایش ستریفیوژ ویلسون و همکاران [20] است تا دقت نتایج حاصل برای اهداف این بخش تا جای ممکن متأثر از مدل رفتاری خاک و پارامترهای کالیبراسیون نباشد. سیستم‌های پی-شمع و میدان آزاد در شرایط خاک اشباع و خشک تحت بار هارمونیک با ۱۱ سیکل، پی‌ریود 0.4 ثانیه و دامنه $0.3g$ با هم مقایسه شده‌اند.

صورت گیرد. در شکل‌های (۴ و ۵) به ترتیب نتایج طیف پاسخ شتاب و تغییرات فشار آب حفره‌ای حاصل از مدلسازی عددی به همراه نتایج آزمایش ستریفیوژ نشان داده شده‌اند. هماهنگی مطلوب نتایج عددی پی-شمع با نتایج آزمایشگاهی، اطمینان از روند خوب مدلسازی سه بعدی را ایجاد کرده است که این امر نشان می‌دهد تمامی عوامل مؤثر در نظر گرفته شده روی پاسخ لرزه‌ای خاک مانند تعیین مدل رفتاری و پارامترهای آن، تعیین ابعاد کلی و ابعاد المان‌های مدل، شرایط مرزی و در نظر گرفتن المان فصل مشترک خاک و شمع در حد قابل قبولی مناسب است.

۳- پاسخ ساختگاه پی-شمع در برابر میدان آزاد

در بخش قبل به منظور تعیین مقدار عددی پارامترهای مؤثر در رفتار سیستم پی-شمع، مدلسازی و درستی‌آزمایی تنها برای سیستم پی-شمع با استفاده از نتایج آزمایش ستریفیوژ ویلسون و همکاران [20] انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده شده، در مدل آزمایشگاهی Csp2 مناطقی به عنوان میدان آزاد وجود دارد. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی، تفاوت میان میدان آزاد و سیستم پی-شمع به چشم می‌خورد. در ادامه به منظور تعیین میزان تأثیر حضور سیستم پی-شمع در خاک ب‌ه بررسی تفاوت میان طیف پاسخ ساختگاه میدان آزاد و سیستم پی-شمع در خاک روانگرا پرداخته شده است.

شکل ۴. مقایسه طیف پاسخ شتاب حاصل از مدلسازی عددی و آزمایشگاهی (ستریفیوژ)، الف) در محل سازه و ب) دور از سازه در سطح زمین

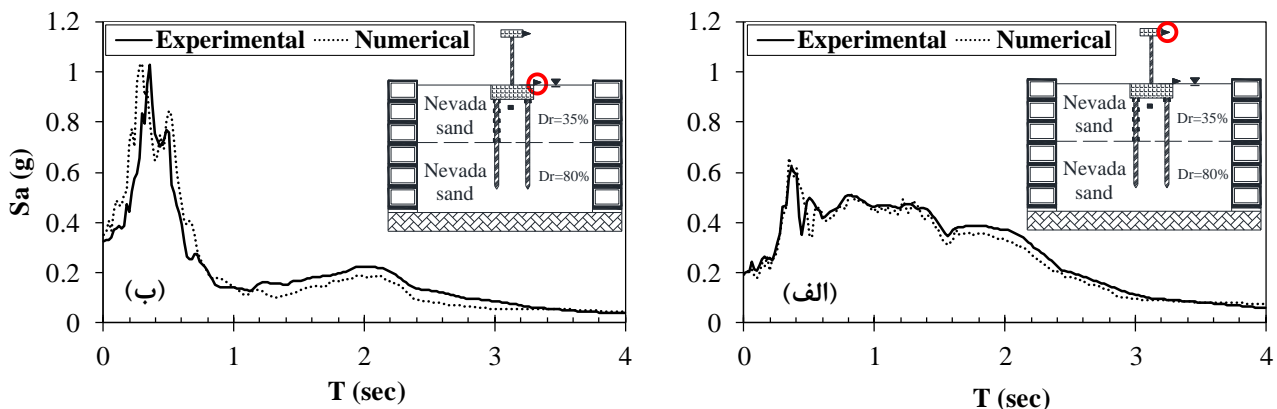


Fig. 4. Comparison between numerical and experimental acceleration response spectra of (a) the superstructure (b) the far-field ground surface

شکل ۵. مقایسه تاریخیچه فشار آب حفره‌ای حاصل از مدلسازی عددی و سنتزفیوژ در نقطه زیر پی

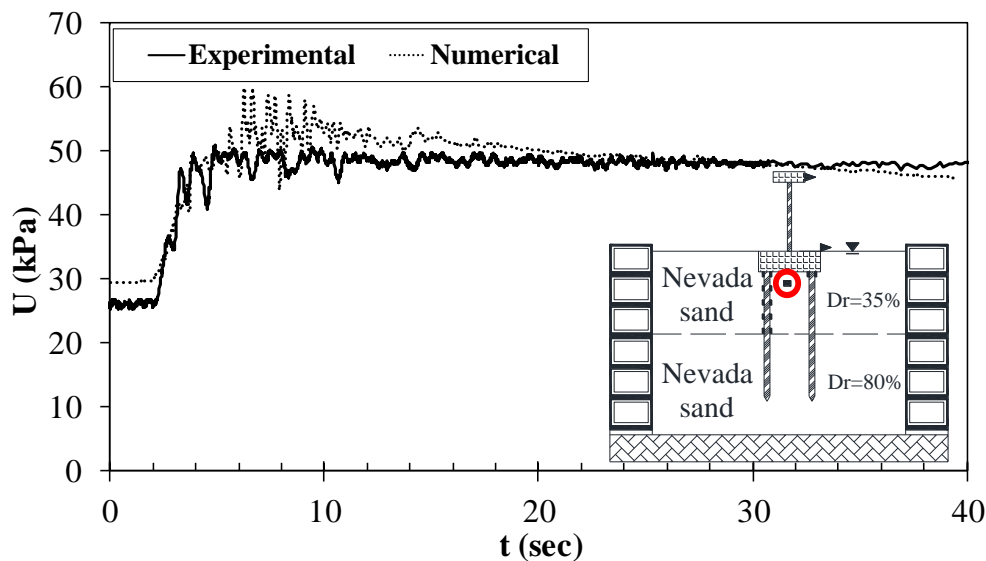


Fig. 5. Comparison between time-histories of numerical and experimental pore water pressure beneath the raft

شکل ۶. الف) میدان آزاد در خاک اشباع، ب) میدان آزاد در خاک خشک، ج) پی-شمع در خاک اشباع، د) پی-شمع در خاک خشک

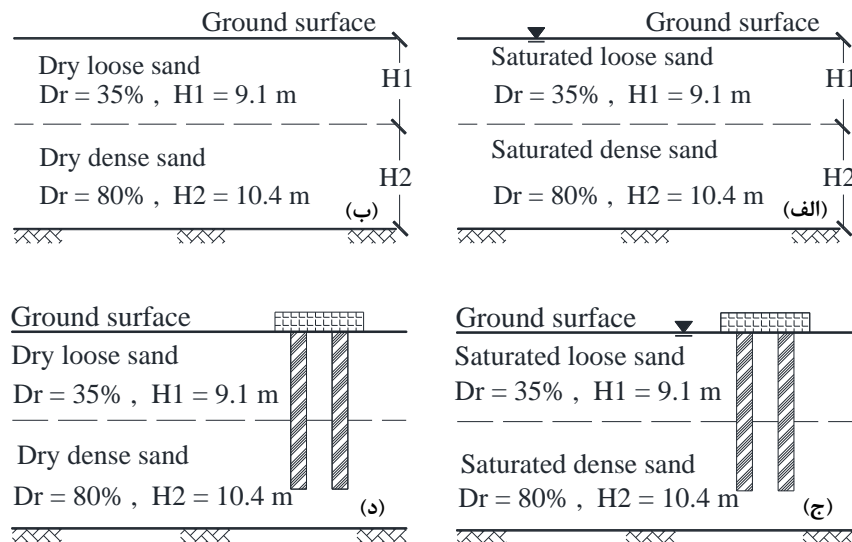


Fig. 6. (a) free-field in the saturated soil (b) free-field in the dry soil (c) piled raft in the saturated soil (d) piled raft in the dry soil

در شکل (۷) طیف‌های پاسخ سیستم‌های پی-شمع و میدان آزاد در سطح زمین با هم مقایسه شده‌اند. برای پی-شمع نقطه سطح زمین در تراز پی سطحی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۷-الف) و (۷-ب) نشان داده شده است، طیف پاسخ شتاب سیستم پی-شمع و میدان آزاد در شرایط روانگرایی کمتر از طیف پاسخ شتاب در خاک خشک بوده که این امر به دلیل ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای در خاک روانگرا و در پی آن نرم‌شدگی خاک است. شایان ذکر است که میزان کاهش طیف پاسخ سیستم پی-شمع از میدان آزاد کمتر است. به عبارت دیگر

همچنین سیستم پی-شمع مانند مدل درستی‌آزمایی شده به صورت ۲×۲ بوده اما شمع‌ها از جنس بتن و مقطع عرضی آن‌ها به صورت دایره‌ای توپر به شعاع ۶۰cm در نظر گرفته شده است تا به واقعیت نزدیکتر باشد. شایان ذکر است در ادامه پژوهش، برای تعیین شرایط روانگرایی مانند بخش درستی‌آزمایی نتایج فشار آب حفره‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده است و نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (r_u) برای خاک سست اشباع در اثر بار وارده برابر یک می‌باشد. برای رعایت ایجاز کلام از ارائه نمودارهای فشار آب حفره‌ای چشم‌پوشی شده است.

اختلاف طیف پاسخ شتاب سیستم پی-شمع در شرایط روانگرا و خشک بسیار کمتر از اختلاف طیف پاسخ میدان‌های آزاد در این دو حالت می‌باشد. زیرا شمع‌ها در هر دو حالت در خاک متراکم قرار دارند و در نتیجه روانگرا شدن خاک در لایه بالایی تأثیر کمی بر طیف پاسخ شتاب که از طریق شمع به سطح زمین انتقال می‌یابد دارد. همچنین اختلاف طیف پاسخ در سیستم پی-شمع در دو حالت می‌تواند به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش سختی خاک در لایه دوم باشد.

شکل ۷. مقایسه طیف‌های پاسخ در سطح زمین، الف) میدان‌های آزاد در شرایط خاک روانگرا و خشک، ب) پی-شمع‌ها در شرایط خاک روانگرا و خشک، ج) پی-شمع و میدان آزاد در خاک خشک، د) پی-شمع و میدان آزاد در خاک روانگرا

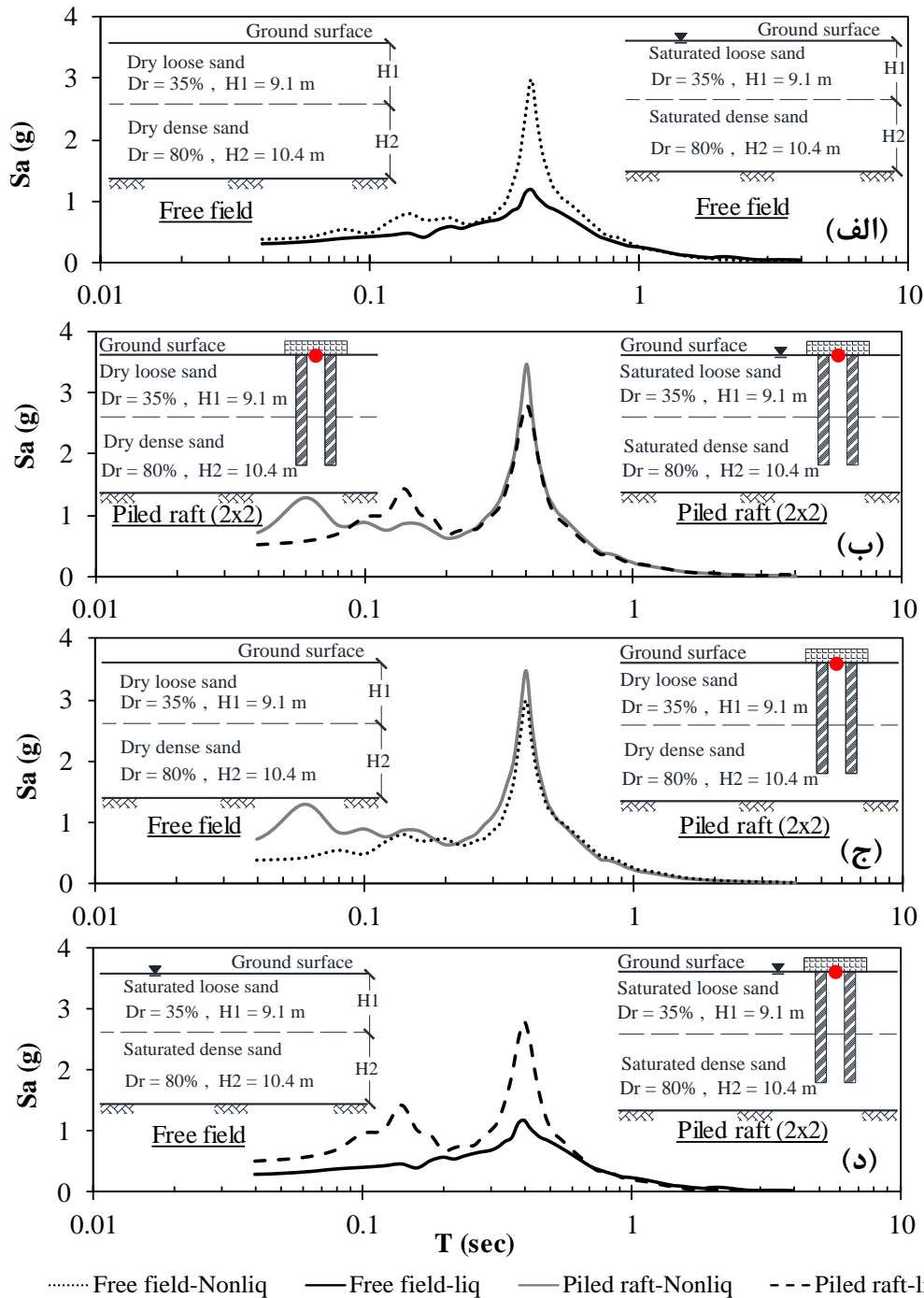


Fig. 7. Comparison of acceleration response spectra at the ground surface among (a) free-field in liquefied and dry soil condition (b) piled raft in liquefied and dry soil condition (c) piled raft and free-field in dry soil condition (d) piled raft and free-field in liquefied soil condition

داشته باشند. در بخش بعدی به بررسی برخی از این عوامل بر پاسخ ساختگاه پرداخته شده است.

۴- بررسی برخی عوامل مؤثر بر پاسخ ساختگاه پی-شمع

پارامترهای مختلفی از جمله مشخصات حرکت ورودی زلزله مانند محتوای فرکانسی، دامنه حرکت، ابعاد و سختی جانبی سیستم پی-شمع، مشخصات مکانیکی خاک محل، ارتفاع سازه، فشار سربار ناشی از سازه و ... بر پاسخ سیستم پی-شمع در خاک روانگرا تأثیر می‌گذارند. بررسی تأثیر تمام این پارامترها بصورت همزمان بسیار پیچیده و زمانبر می‌باشد. با توجه به اینکه هدف از این مقاله بررسی تأثیر حضور پی-شمع بر پاسخ ساختگاه است بنابراین در این بخش به بررسی تأثیر محتوای فرکانسی، دامنه و سختی جانبی سیستم پی-شمع در خاک روانگرا و تحت اثر بارهای هارمونیک پرداخته شده است. همچنین با توجه به اینکه زلزله دارای طیف وسیعی از فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف است، در انتهای این بخش به منظور بررسی و مقایسه پاسخ ساختگاه میدان آزاد و سیستم پی-شمع در اثر حرکت واقعی زلزله، به عنوان نمونه طیف پاسخ ساختگاه‌های روانگرا و خشک در شرایط میدان آزاد و پی-شمع تحت اثر زلزله منجیل مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند.

در شکل (۷-ج و ۷-د) طیف‌های پاسخ شتاب پی-شمع و میدان آزاد در شرایط روانگرا و خشک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شرایط خشک، طیف‌های پاسخ پی-شمع و میدان آزاد در پریود 0.4 ثانیه در حدود 17 درصد با یکدیگر اختلاف دارند اما در خاک روانگرا طیف پاسخ سیستم پی-شمع در پریود 0.4 ثانیه حدود 63 درصد بیشتر از طیف پاسخ میدان آزاد است. این امر نشان می‌دهد که کاهش سختی لایه بالایی در صورتی که شرایط روانگرایی در آن رخ ندهد، زیاد نیست. اما زمانی که خاک لایه بالا روانگرا شود، در اثر نرم‌شدگی، طیف پاسخ شتاب در میدان آزاد بسیار کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده شده است وجود سیستم پی-شمع سبب افزایش سختی ساختگاه در هر دو شرایط خاک روانگرا و خشک شده و در نتیجه باعث ایجاد اختلاف در طیف پاسخ ساختگاه میدان آزاد و سیستم پی-شمع می‌شود. همچنین وجود آب و ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای نیز باعث تغییر در پاسخ ساختگاه خواهد شد. علاوه بر اشباع بودن خاک و حضور آب عوامل دیگری مانند پارامترهای مکانیکی خاک، طول شمع، قطر مقطع شمع، جنس مصالح شمع، تعداد شمع‌ها، محتوای فرکانسی، دامنه حرکت ورودی و مدت آن می‌توانند تأثیر بسزایی بر طیف پاسخ ساختگاه

شکل ۸. مقایسه طیف‌های پاسخ شتاب در سطح زمین در سیستم پی-شمع 2×2 با جنس مصالح بتنی، آلومینیومی و پی-شمع 4×3 با جنس مصالح بتنی

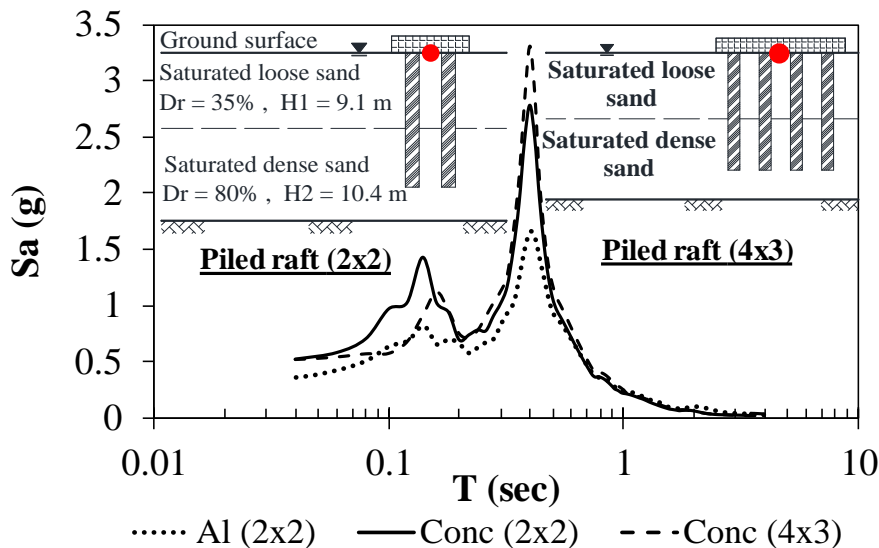


Fig. 8. Comparison of acceleration response spectra of 2x2- concrete piled raft, 2x2- aluminum piled raft and 4x3- concrete piled raft at the ground surface

۴-۱- سختی جانبی شمع

مشخصات فنی سیستم پی-شمع با مصالح آلومینیومی مشابه سیستم پی-شمع در آزمایش ستریفیوژ ویلسون و همکاران [20] بوده اما مشخصات فنی سیستم‌های پی-شمع بتنی همانند سیستم‌های پی-شمع در هر سه سیستم با هم برابر اما قطر شمع سیستم‌های بتنی حدود ۳ برابر از سیستم آلومینیومی بیشتر است. بنابراین برای افزایش سختی جانبی علاوه بر تغییر چیدمان شمع‌ها و تعداد آن‌ها، مصالح و ابعاد آن‌ها نیز تغییر کرده است. حرکت ورودی نیز مشابه حرکت ورودی در بخش قبل، بار هارمونیک با پریود ۰/۴ ثانیه، دامنه ۰/۳g و ۱۱ سیکل می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، با افزایش سطح جانبی و تغییر مصالح از آلومینیوم به بتن در سیستم پی-شمع ۲×۲ اختلاف چشمگیری در حدود ۷۶ درصد در پریود ۰/۴ ثانیه رخ داده است. با افزایش تعداد شمع‌ها نیز سختی سیستم افزایش یافته و طیف پاسخ شتاب در پریود ۰/۴ ثانیه حدود ۱۷ درصد از سیستم بتنی ۲×۲ بیشتر است. با افزایش سختی سیستم پی-شمع تأثیر نرم‌شدگی خاک در اثر روانگرایی و افزایش فشار آب حفره‌ای بر طیف پاسخ شتاب کمتر می‌شود.

۴-۲- دامنه حرکت ورودی

در شکل (۹) طیف پاسخ شتاب سیستم پی-شمع ۲×۲ تحت بار هارمونیک با پریود ۰/۴ ثانیه و دامنه‌های ۰/۱۵g و ۰/۳g با هم مقایسه شده‌اند. با افزایش دامنه و قوی‌تر شدن حرکت

ورودی، اضافه فشار آب حفره‌ای سریعتر افزایش یافته و همچنین پس از اتمام حرکت لرزه‌ای نیز زمان بیشتری برای از بین رفتن این اضافه فشار آب حفره‌ای نیاز است، بنابراین خاک برای زمان طولانی‌تری در شرایط روانگرایی قرار دارد و در نتیجه می‌بایست شتاب کمتری به سطح زمین انتقال یابد. اما به دلیل اینکه شتاب انتقالی به سطح زمین از طریق سیستم پی-شمع انجام پذیرفته و انتهای شمع‌ها در لایه متراکم که در هیچکدام از دو حرکت ورودی روانگرا نشده است قرار دارد، بنابراین حرکت با دامنه بزرگتر، شتاب بیشتری را به سطح زمین منتقل می‌کند.

۴-۳- محتوای فرکانسی حرکت ورودی

در شکل (۱۰) طیف پاسخ شتاب سیستم پی-شمع ۲×۲ تحت بار هارمونیک با پریودهای ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۷ ثانیه و دامنه ۰/۳g نشان داده شده است. با توجه به دامنه ثابت حرکت با افزایش پریود، زمان حرکت نیرومند زمین افزایش یافته در نتیجه خاک پس از رسیدن به شرایط روانگرایی برای زمان طولانی‌تری در شرایط روانگرایی قرار می‌گیرد بنابراین در اثر نرم‌شدگی بیشتر، ظاهراً می‌بایست شتاب کمتری به سطح زمین انتقال یابد. اما همان‌طور که در بخش (۴-۲) شرح داده شد، به دلیل قرار داشتن انتهای شمع‌ها در لایه دوم که غیر روانگرا می‌باشد، روانگرایی لایه بالا تأثیر چندانی بر طیف پاسخ شتاب در سطح زمین نداشته و با قویتر شدن حرکت، شتاب انتقالی به سطح زمین افزایش می‌یابد.

شکل ۹. طیف‌های پاسخ شتاب در سطح زمین در سیستم پی-شمع ۲×۲ تحت بار هارمونیک با پریود ۰/۴ ثانیه و دامنه‌های ۰/۱۵g و ۰/۳g

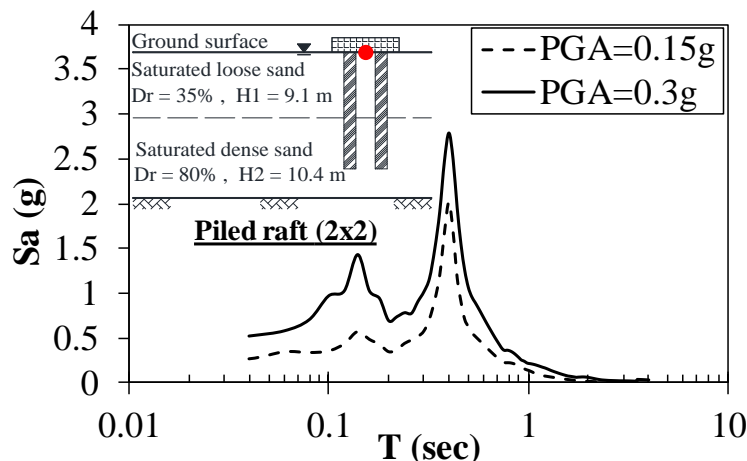


Fig. 9. Acceleration response spectra of 2x2- piled raft at the ground surface subjected to base motions with period of 0.4 sec and maximum accelerations of 0.15 g, 0.3 g

۴-۴- رکورد واقعی زلزله

طیف پاسخ در خاک خشک است. اختلاف طیف پاسخ روانگرا و خشک در میدان آزاد حدود ۵۰ درصد و در سیستم پی - شمع حدود ۳۰ درصد است. علت این اختلاف تأثیرپذیری طیف پاسخ سیستم پی - شمع در سطح زمین از حضور شمع‌ها می‌باشد. انتهای شمع‌ها در خاک خشک قرار دارد در نتیجه روانگرایی لایه بالایی تأثیر زیادی در کاهش طیف پاسخ پی - شمع در خاک روانگرا ندارد.

همان‌گونه که در ابتدای این بخش بیان شده است، در این مطالعه زلزله منجیل با پریود غالب ۰/۱۶ ثانیه، پریود میانگین ۰/۳۳ ثانیه و بیشینه شتاب سنگ بستر ۰/۵۱g به عنوان حرکت ورودی مدنظر قرار گرفته است. شکل (۱۱-الف) طیف پاسخ میدان آزاد و شکل (۱۱-ب) طیف پاسخ ساختگاه پی - شمع در خاک روانگرا و خشک را نشان می‌دهند. در هر دو شرایط میدان آزاد و پی - شمع طیف پاسخ در خاک روانگرا به دلیل ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای و نرم‌شدگی خاک، کمتر از

شکل ۱۰. طیف‌های پاسخ شتاب در سطح زمین در سیستم پی - شمع ۲×۲ تحت بار هارمونیک با پریودهای ۰/۱، ۰/۴ و ۰/۷ ثانیه و دامنه ۰/۳g

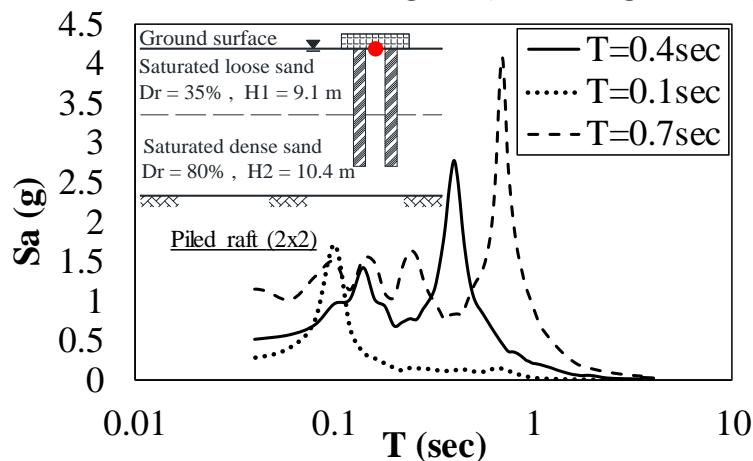


Fig. 10. Acceleration response spectra of 2x2- piled raft at the ground surface subjected to the base motions with maximum acceleration of 0.3 g and periods of 0.1, 0.4, and 0.7 sec

شکل ۱۱. طیف‌های پاسخ شتاب در سطح زمین تحت بار لرزه‌ای منجیل، (الف) میدان آزاد، (ب) سیستم پی - شمع در خاک روانگرا و خشک

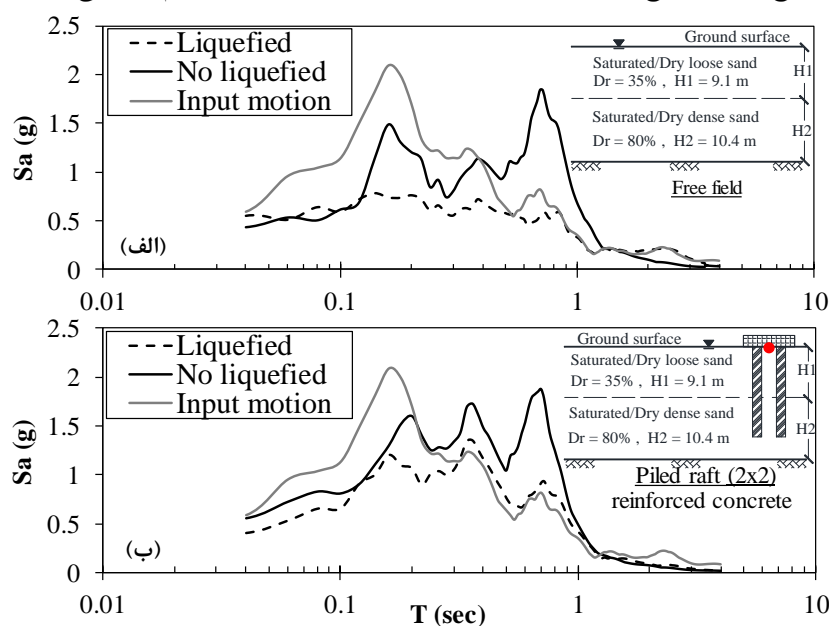


Fig. 11. Acceleration response spectra at the ground surface under the Manjil earthquake (a) free-field (b) piled raft at the liquefied and dry soil

شمع‌ها در لایه غیرروانگرا سبب می‌شود که افزایش شدت روانگرایی لایه بالایی در اثر قویتر شدن حرکت ورودی تأثیری بر پاسخ شتاب در سطح زمین نداشته باشد. در نتیجه در سیستم پی-شمع بار لرزه‌ای بزرگتری به روسازه وارد شده و این موضوع می‌تواند طراحی روسازه را تحت تأثیر قرار دهد و بهتر است برای طراحی این نوع سازه‌ها در آیین‌نامه‌های طراحی مورد توجه قرار گیرد.

۶- قدردانی

این مقاله در راستای پروژه پژوهشی مصوب و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با کد فعالیت ۶۷۲۷ و کد پروژه ۶۰۷ صورت گرفت.

References

- [1] Guideline for Assessment of Soil Liquefaction Potential, Consequences and Mitigation Methods No.525. (2012). In Persian.
- [2] Preliminary report of Dashti-Bushehr earthquake, Mw= 6.3, 2013-04-09. <http://www.iiies.ac.ir/fa/eqreports/page/2/>.
- [3] Rahmani, A., Pak, A. 2012 Dynamic behavior of pile foundation under cyclic loading in liquefiable soils. *Comput Geotech*, 40(0), 114-126. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.09.002>.
- [4] Finn WDL, Fujita N. 2002 Pile in liquefiable soils: seismic analysis and design issues. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 22:731-42.
- [5] Klar, A., Baker, R., Frydman, S. 2004 Seismic soil-pile interaction in liquefiable soil. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 24:551-64.
- [6] Uzuoka, R., Sento, N., Kazama, M. 2007 Three dimensional numerical simulation of earthquake damage to group-pile in a liquefied ground. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 27:395-413.
- [7] Cheng, Z., Jermic, B. 2009 Numerical modeling and simulation of pile in liquefiable soil. *Soil Dyn Earthquake Eng*, 29(11), 1405-1416.
- [8] Comodromos EM, Papadopoulou MC, Rentzepris IK. 2009 Pile foundation analysis and design using experimental data and 3-D numerical analysis. *Comput Geotech*, 36:819-36.
- [9] Elgamal, A., L. J., F. D. 2009 Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation. *J of Geotech and Geoenviron Eng*, 135, 1672-1682.

۷- مراجع

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که طیف پاسخ ساختگاه در حالت روانگرایی به دلیل ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای و نرم‌شدگی خاک با حالت خشک متفاوت است. ضریب بزرگ‌نمایی در خاک روانگرا به دلیل کاهش سختی خاک در حین زلزله و افزایش میرایی آن نسبت به خاک خشک کمتر است و در نتیجه نیروی لرزه‌ای کمتری به روسازه وارد خواهد شد. اما از سوی دیگر در اثر روانگرایی مقاومت خاک نیز کاهش یافته و همچنین تغییرشکل‌های دائمی بوجود آمده در خاک می‌تواند منجر به ایجاد تغییرشکل‌های قائم و افقی بزرگ و غیریکنواخت شود. نکته مهم دیگر که باید به آن توجه شود اینست که پاسخ طیفی ساختگاه در خاک روانگرا در حالت پی-شمع و میدان آزاد با هم متفاوت است. حضور پی-شمع می‌تواند سبب افزایش ضریب بزرگ‌نمایی شود. زیرا در خاک روانگرا، شمع‌ها از لایه روانگرا عبور کرده و انتهای آن‌ها در لایه خشک قرار می‌گیرد. در نتیجه روانگرایی لایه سست تأثیری در بزرگ‌نمایی حرکت ثبت شده در بالای سیستم پی-شمع ندارد. همچنین با افزایش سختی، دامنه حرکت ورودی و پی‌ود بار وارد شده، پاسخ شتاب روی سیستم پی-شمع افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که قرار گرفتن انتهای

- [18] Gang, G., Jian-min, L. 2011 Effects of ground treatment on site seismic response. *IEEE Xplore*, 1198-1202.
- [19] Floroiu, L. G., and Schweiger, H. F. 2015 Parametric study of the seismic ground response of a linear visco-elastic soil layer improved by stone columns or pile-like elements. *Geotechnik*, 38, 304-315.
- [20] Wilson, D. 1998 Soil-Pile-Superstructure interaction in liquefying sand and soft clay. Ph.D. Dissertation, University of California at Davis.
- [21] Jeremic, B. 2001 Development of geotechnical capabilities in OpenSees. EERI.
- [22] Mazzoni, S., McKenna, F., S. M.H , F. G.L. 2005 OpenSees command language manual.
- [23] Prevost, J. 1985 A simple plasticity theory for frictional cohesionless soil. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 4, 9-17.
- [24] Elgamal, A. Y. Z., P. E ., R. A. 2003 Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils. *Int. J. of Plasticity*, 19 , 883-905.
- [25] Arumoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M., Fruth, L.S. 1992 Verification of liquefaction analysis by centrifuge studies laboratory testing program soil data report. National Science Foundation.
- [26] Wriggers, P. 2002 *Computational Contact Mechanics*. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England.
- [27] Laursen, T. A. 2002 *Computational Contact and Impact Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin
- [10] Wang, R., Fu, P., Zhang, J. 2016 Finite element model for piles in liquefiable ground. *Comput Geotech*, 72:1-14.
- [11] Dash, S., Rouholamin, M., Lombardi, D., Bhattacharya, S. 2017 A practical method for construction of p-y curves for liquefiable soils. *Soil Dyn Earthq Eng*, 478-481.
- [12] Eslami, A. 2011 Bearing capacity of the central cone penetration test results using candles CPTU's marine environment. *Sharif journal*, Vol 2-26, No. 3, 81-94. (Text in Persian)
- [13] Sedighi, P., Eslami, A., Aflaki, E. 2014 Effect of cement treatment on shear strength parameters of difficult soil from southern coastlines of the Caspian Sea. *Sharif Journal*, Vol 29-2, Issue 4, 97-107. (Text in Persian)
- [14] Jafarian, Y., Miraei, M. 2016 Probabilistic seismic vulnerability of caisson quay walls: case study of Kobe Port. *Sharif Journal*, Vol 31.2, Issue 4.2, 3-12. (Text in Persian)
- [15] Zekri, A., Aminfar, M. H., Ghalandarzadeh, A., Lotfollahi Yaghin, M.A., Ghasemi, P. 2016 Effects of soil improvement on seismic behavior of anchored sheet pile quay walls embedded in liquefiable sites. *Sharif Journal*, Vol 32.2, Issue 1.1, 55-67. (Text in Persian)
- [16] Zai-qiang, H., Jun-xing, W., Lan-lan, L., Li-Jie, J. 2008 Finite element analysis of seismic behavior of composite foundation with bedding cushion. *Rock and Soil Mechanics*, 29 , 587-592.
- [17] Yan-Ping, G., Kai-Jing, L., Jun, D. 2009 Effects of composite foundation on site seismic response. *Rock and Soil Mechanics*, 30, 211-214.

Three-dimensional numerical modeling for seismic response of piled raft in saturated sand with emphasis on local site effect

M. Fallahzadeh¹, Y. Jafarian^{2*}, A. Haddad³

1 Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2 Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

3 Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan

yjafarianm@iiees.ac.ir

Abstract:

Saturated loose soils have constituted superficial layers of the ground in vast regions of the earth. For instance, geotechnical site investigations have revealed that shoreline of the Mazandaran Sea in Iran involves thick layers of uniform sand mixtures. Presence of such soil deposits in the northern and southern Iran, which are prone to seismic activity, may produce severe damages due to liquefaction occurrence. To prevent earthquake damages to the structures relied on liquefiable soils two strategies might be preferred: (1) improvement of liquefiable soil and ceasing liquefaction, and (2) bypassing the liquefiable layer via deep foundations. The latter strategy aims to transfer the superstructure load to the underlying stiff layer by end-bearing piles while raft foundation is also required because the superficial liquefiable soil may be unable to provide sufficient bearing capacity due to seismic pore pressure generation. In pile-raft systems passing through the liquefiable layer it seems that the liquefiable layer has less influence to the response of the system. However, several interactions in the environment such as pile-liquefiable soil, pile-pile, pile-raft, and raft-liquefiable soil could result in a sophisticated problem; affecting the amplification of the upward propagating seismic waves. Amplification of seismic wave denotes variations of amplitude and frequency content of upward propagating wave passing through the reinforced liquefiable soil layer. It is expected that the pile-raft system in conjunction with the liquefiable layer considerably change seismic response of the ground compared with the free-field liquefiable ground in the absence of pile-raft system. In the design of routine projects for which the national seismic building code is employed, there is no clear recommendation to account for the influence of pile-raft on the site amplification factors. The currently used building codes have poorly addressed the problem; and thus, considerable researches might be required.

The aim of this paper is to study the characterization of seismic wave amplification by considering the presence of piled raft. To achieve this goal three-dimensional numerical modeling of piled raft and free-field in both liquefied and dry sand deposit is used. Results of some centrifuge experiments of a piled raft structure on liquefied sand are used to evaluate the predictive capabilities of the numerical model constructed in OpenSees, as a state-of-the-art numerical tool. Fully-coupled solid-fluid 3D nonlinear numerical simulations were performed in OpenSees, in combination with the pressure-dependent-multiyield soil constitutive model that enables dynamic effective-stress modeling of soil liquefaction in addition to embedded pile and superstructure elements. The numerical simulation results demonstrated reduction of seismic wave amplification in liquefied sand versus dry sand due to reduction of soil strength and increase damping. In both liquefied and dry state, the presence of piled-raft increases the soil stiffness and seismic wave amplification. The level of site amplification depends on many factors such as lateral stiffness of the pile-raft system and characteristics of input motion. Parametric study was then carried out to address these factors. Results of this study indicate that amplification factor decreases due to the presence of liquefied soils. However, the decrease of amplification factor at the free-field is larger than pile-raft foundation. Furthermore, amplification factor increases due to increase of pile stiffness, amplitude and period of input motion. Therefore, the site-specific analysis might be necessary to account for the presence of piled raft system in the sites involving thick sand layers.

Key words: Liquefaction, Piled raft, Waves amplification, Dynamic analysis