



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

رفتار سنجی شالوده های عمیق در زمین های روانگرایی سواحل جنوبی خزر تحت بار لرزه ای به روش اجزاء محدود

احسان علی پور^۱، بابک فضلی مالیدره^۲، سیده منا تابنده^۳، حمیدرضا جلالپور بارفروش^۴

۱- کارشناسی ارشد عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل

۲- دکتری عمران استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل

۳- دکتری عمران مربی گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد بابل

۴- مشاور ارشد شرکت مهندسی مشاور رهاب ساخت شمال

چکیده

یکی از روش های ایمن سازی سازه ها در مقابل خسارات ناشی از روانگرایی استفاده از سیستم رادیه - شمع است. روانگرایی خاک یکی از عوامل اصلی موثر بر رفتار دینامیکی شمع ها در مناطق با لرزه خیزی زیاد است. عملکرد سیستم رادیه - شمع در خاک های مستعد روانگرایی در معرض بارگذاری زلزله بسیار پیچیده است. هنوز عدم قطعیت درک صحیح مکانیزم پیچیده اندرکنش خاک - شمع در خاک مستعد روانگرایی وجود دارد، از این رو نیاز به انجام مطالعات شبیه سازی عددی و ارزیابی اثرات شمع و گروه شمع بر استعداد روانگرایی، بخصوص تحت بارگذاری لرزه ای، ضروری به نظر می رسد. در این تحقیق سعی شده با استفاده از تحلیل های نرم افزاری رفتار فونداسیون های عمیق (شمع ها) در زمین های روانگرا مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای موثر بر نشست بررسی گردد. با توجه به انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی به روش تنش موثر و انتظار تغییر شکل های بزرگ، از نرم افزار تفاضلات محدود (FLAC 2D (ver.5) در جهت تجزیه و تحلیل ها استفاده شده است. الگوی پایه تحلیل ها شامل لایه خاک ماسه اشباع مسلح شده با گروه شمع که تحت اثر سربار قرار می گیرد، می باشد و برای یک گروه شمع، مشاهده شد هرچه طول شمع افزایش پیدا کند میزان نشست گروه شمع کاهش می یابد و برای یک گروه شمع متکی در ماسه متراکم، مشاهده شد هرچه تعداد شمع در ردیف گروه بیشتر شود (با میزان بار کل ثابت) میزان نشست کاهش می یابد و این تغییرات تقریباً خطی به نظر می رسد. بررسی نتایج نشان می دهد که قرار دادن گروه شمع در ماسه سست و نیمه متراکم با درصد تراکم ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد، در هنگام روانگرایی ناپایداری را به دنبال خواهد داشت و برای یک گروه شمع، مشاهده شد با افزایش قطر ابتدا نشست کاهش می یابد و سپس افزایش می یابد، که بهینه قطر گروه شمع در خاک ماسه ای متراکم، در محدوده ۰/۷ الی ۰/۹ متر می باشد و میزان نشست با طول نفوذ در لایه متراکم رابطه معکوس دارد. هرچه طول نفوذ بیشتر باشد نشست کمتر خواهد شد.

کلمات کلیدی: شالوده های عمیق، زمین های روانگرا، بارهای لرزه ای، روش اجزاء محدود، خاک های سواحل جنوبی

خزر.



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۱- مقدمه

روانگرایی یکی از مهم ترین، پیچیده ترین و بحث انگیزترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه ای می باشد. عملکرد شمع ها در خاک روانگرا تحت بارگذاری زلزله به سبب اثرات فشار آب منفذی ایجاد شده در خاک اشباع مسئله ای بسیار پیچیده می باشد. رسوبات ماسه ای سست در طول زلزله تبدیل به وضعیتی شبیه مایع می شوند. این پدیده روانگرایی نامیده می شود. افزایش فشار آب منفذی در شرایط زهکشی نشده نشانه اصلی تمام پدیده های روانگرایی می باشد که کرنش های بزرگ و تغییر شکل زیاد و پیوسته ایجاد می شود.

بطور کلی رفتار یک شمع در خاک روانگرا به چندین پارامتر بستگی دارد. از جمله نوع خاک، شدت زلزله، فرکانس غالب زلزله و طول شمع. کارواژال^۱ و همکاران [۱۹] نشان دادند که محتوای فرکانسی زلزله بر روی رفتار دینامیکی خاک تحت بار لرزه ای تاثیر می گذارد. کستادینف^۲ و همکاران [۲۰] نشان دادند که روانگرایی خاک به طور قابل توجهی به پیک شتاب و فرکانس بارگذاری زلزله بستگی دارد. باتاچاریا [۱۳] نشان داد که مکانیزم های گسیختگی شمع به طول، قطر و مقاومت مصالح شمع بستگی دارد. چنگ^۳ و همکاران [۳۳] روش عددی بر پایه المان محدود برای مدلسازی و شبیه سازی شمع در خاک روانگرا ارائه نمودند. در این روش جهت مدلسازی خاک، شمع و اعمال بار زلزله، در طی سه مرحله انجام شده است.

کاگاوا^۴ [۳۴] مطالعه تحلیلی پارامتریک انجام داد تا اثر خاک و شرایط بارگذاری مختلف را روی رفتار یک شمع منفرد در خاک روانگرا بررسی کند. کاگاوا و همکاران از آزمایش میز لرزان نتیجه گرفتند که فشار آب منفذی به طور عمده با توزیع مجدد و پراکندگی تاثیر می پذیرد و روی پاسخ سیستم خاک- شمع تاثیر می گذارد. نتیجه آزمایشگاهی کاگاوا و همکاران نشان می دهد که در بیشتر حالات، فشار آب منفذی اضافی بین شمع ها بزرگتر از آن در همان تراز در فاصله دورتر از شمع ها می باشد.

از سوی دیگر ساکوجو^۵ و همکاران [۳۵] آزمایش میز لرزان را روی گروه شمع که شامل ۳۶ شمع می باشد انجام دادند و نشان دادند که حضور گروه شمع، میزان فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده را در هر زمان کاهش می دهد و همچنین با شرایط میدان آزاد مقایسه کرد و نشان داد که حضور گروه شمع حتی ممکن است مانع روانگرایی خاک های ماسه ای شود. نتایج آزمایشات میز لرزان و تحلیل عددی فشار آب منفذی اضافی (Δu) برای حالت بدون حضور گروه شمع و حالت با حضور گروه شمع بدست آمده است. نتایج نشان می دهد که گروه شمع می تواند مقاومت روانگرایی خاک های ماسه ای را افزایش دهد. برای حالت با حضور گروه شمع، افزایش فشار آب منفذی اضافی بسیار کمتر از حالت بدون حضور گروه شمع می باشد.

بنابراین آیا ترکیب گروه شمع، اضافه فشار آب منفذی ایجاد شده را کاهش می دهد و یا تداخل در زهکشی مانع پراکندگی فشار آب منفذی شده و در نتیجه باعث افزایش فشار آب منفذی شود.

کلار^۶ و همکاران [۳۲] با انجام تحلیل عددی به بررسی اثرات گروه شمع نامحدود در خاک های مستعد روانگرایی بر روی استعداد روانگرایی چنین خاک هایی، پرداختند. بطوریکه شمع ها در یک لایه ماسه همگن به ضخامت ۱۵ متر با تراکم نسبی

$D_r = 60\%$ و ضریب نفوذپذیری $K = 10^{-4} m/s$ واقع شده است. سطح آب زیرزمینی در عمق ۱/۵ متری و قطر شمع

۰/۵m با مدول ارتجاعی $3 \times 10^7 \text{ Kpa}$ می باشد. رکورد زلزله یک اکتبر ۱۹۸۷ ویتیرا^۷ برای اعمال بارگذاری لرزه ای انتخاب شده بود که فرکانس اصلی آن در حدود ۵/۵ تا ۷ هرتز می باشد. در تحلیل انجام شده توسط کلار و همکاران نسبت فشار آب منفذی بیشینه بدون رسیدن به وضعیت روانگرایی ناپایدار برابر با ۰/۷۵ می باشد. بنابراین خطوط منحنی تراز ۰/۷۵ شرایط بین

¹ Carvajal

² Kostadinov

³ Cheng

⁴ Kagawa

⁵ Sakajo

⁶ Klar

⁷ whittier

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

وضعیت پایدار و روانگرایی را نشان می‌دهد. یک نتیجه چشمگیر حاصل از تعدادی تحلیل، نشان می‌دهد که در حالت حضور شمع، مقدار فشار آب منفذی اضافی بیشینه کوچکتر از آن در حالت میدان آزاد می‌باشد. در حالت حضور گروه شمع، در برخی موارد نسبت فشار آب منفذی اضافی بیشینه به یک مقدار کمتر از ۰/۴۵ رسیده است، که با مقدار ۰/۵۵ (نسبت فشار آب منفذی اضافی بیشینه در همان زمان و مکان در حالت میدان آزاد) مقایسه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که چطور فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده در خاک به بارگذاری و شرایط زهکشی بستگی دارد و همچنین نشان می‌دهد فاصله بهینه بین شمع‌ها که کمترین نسبت فشار آب منفذی (r_u) را نتیجه می‌دهد، در محدوده

می‌باشد. مقدار r_u هم برای فاصله‌های نزدیک، در اثر اختلال در زهکشی افزایش می‌یابد و هم برای فاصله بزرگتر، در اثر بارگذاری اینرسی زیاد ناشی از روسازه بر روی هر شمع نیز افزایش می‌یابد.

فشار آب منفذی اضافی ایجاد شده برای فاصله بین شمع‌ها $\frac{s}{B} = 6,9$ و جرم روسازه $n_b \rho_f = 8,16$ را برای چهار عمق

مختلف $\frac{z}{B} = 5, 10, 15, 20$ و برای فاصله‌های مختلف d از محور شمع می‌باشد [۳۲]. لیو و همکاران [۳۷] با انجام تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D بر پایه تفاضلات محدود به بررسی اثرات شمع‌های زهکش-صلب بر استعداد روانگرایی خاک ماسه‌ای سست پرداختند. شکل (۲-۲۹) مدل در نظر گرفته شده توسط لیو و همکاران را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این مدل شامل یک لایه مستعد روانگرایی به ضخامت ۸ متر در وسط و دو لایه غیر مستعد روانگرایی به ضخامت ۱ متر واقع در بالا و پایین لایه مستعد روانگرایی می‌باشد. طول مدل در جهت X به دلیل ارتعاش در این جهت برابر با ۴۰ متر و طول مدل در جهت Y برابر با ۲۰ متر می‌باشد. سطح مقطع شمع، مربعی با ابعاد ۰.۶*۰.۶ m و طول شمع برابر با ۱۲ متر می‌باشد. نیروی اینرسی سازه فوقانی با یک وزن سنگین بر روی سر شمع شبیه‌سازی شده است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور بررسی عوامل موثر بر نشست فونداسیون عمیق (گروه شمع) از نرم‌افزار تفاضلات محدود FLAC2D نسخه ۵,۰ [۳۸] و به دلیل توانایی آن در تحلیل دینامیکی مسائل مهندسی ژئوتکنیک و همچنین امکان برنامه‌نویسی در این نرم‌افزار توسط زبان Fish، استفاده گردید. در این بخش ابتدا به شرح کلی ویژگی‌ها و مبانی نرم‌افزار مذکور پرداخته خواهد شد و سپس مراحل الگوسازی توسط FLAC ارائه خواهد شد، و در آخر صحت روش الگوسازی مورد استفاده در این پژوهش از طریق شبیه‌سازی دو الگوی تحلیل شده در متون فنی معتبر و مقایسه نتایج موجود، مورد تأیید قرار خواهد گرفت.

۲-۱- مراحل مدل‌سازی

در مدل حاضر جهت انجام تحلیل‌های عددی از پروفیل خاکی به طول‌های ۵۰ و ۸۰ متر و به عمق ۲۰ و ۲۵ متر استفاده شده است. مدل تفاضلات محدود به ۱۴۸۰ المان (۷۴ المان در جهت محور X و ۲۰ المان در جهت محور Y) تقسیم بندی شده است. برای الگوسازی شمع از المان الاستیک خطی شمع استفاده گردید و هر شمع با توجه به طول آن به المان‌های مختلف تقسیم شده است.

۲-۱-۱- بررسی حالت اثر افزایش طول شمع بر نشست گروه شمع‌ها

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در مدل از دولایه خاک ماسه‌ای استفاده شده است که لایه بالایی ماسه سست با درصد تراکم ۴۰٪ و ضخامت ۱۰ متر و لایه پایینی ماسه متراکم با درصد تراکم ۸۰٪ و ضخامت ۱۰ متر که کاملاً اشباع می‌باشند. سپس مشخصات ماسه سست و اشباع مطابق جدول ۱ به مدل وارد شد. برای ایجاد حالت اشباع کامل سطح آب در تراز زمین در نظر گرفته شد. پس از معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذپذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل شد و در این مرحله جابجایی‌ها صفر گردید، سپس مدل‌سازی گروه شمع با دو شمع در هر ردیف با قطر ثابت ۱ متر و با طول‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ متر انجام گردید و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی‌ها صفر گردید تا اثر هر مرحله از تغییرات جداگانه بررسی گردد. در گام بعدی بارگذاری انجام شد (هر شمع ۵۰ کیلو نیوتن) و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل فین جهت اعمال خصوصیات روانگرایی به لایه بالایی که احتمال روانگرایی آن زیاد است تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید. سپس پارامترهای زلزله مورد نظر که در این جا زلزله کوبه می‌باشد با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله آنالیز دینامیکی شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱ میزان نشست بیشینه گروه شمع در اثر تغییر طول

مشخصات حالت	قطر شمع D(m)	طول کل شمع L(m)	طول نفوذ شمع در خاک متراکم l (m)	میزان نشست گروه شمع (mm) شتاب ۰/۳g	میزان نشست گروه شمع (mm) شتاب ۰/۵g
۱	۱	۱۳	۲	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار
۲	۱	۱۴	۳	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار
۳	۱	۱۵	۴	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار	عدم کفایت طول نفوذ - مدل ناپایدار
۴	۱	۱۶	۵	۱۲۰	۲۶۵
۵	۱	۱۷	۶	۶۰	۱۳۴/۵
۶	۱	۱۸	۷	۳۸/۵	۷۶/۵
۷	۱	۱۹	۸	۲۲	۵۶
۸	۱	۲۰	۹	۱۹	۳۴

با توجه به اعداد جدول فوق (استخراج شده از نرم افزار) نشست گروه شمع بر حسب تغییرات طول را برای دو شتاب ۰/۳g و ۰/۵g را نشان می‌دهد.

۲-۱-۲- بررسی حالت اثر افزایش قطر شمع بر نشست گروه شمع

جهت مدل‌سازی در فضای نرم افزار FLAC2D از دولایه خاک ماسه‌ای با مشخصات زیر استفاده شده است. لایه اول از جنس ماسه سست با تراکم نسبی ۴۰٪ و دارای ضخامت ۱۰ متر می‌باشد. و لایه دوم از جنس ماسه متراکم با تراکم نسبی ۸۰٪ و ضخامت ۱۰ می‌باشد. مشخصات ماسه سست و متراکم اشباع استفاده در فوق در جدول (۳-۱) آمده است. همچنین تراز آب زیرزمینی تا سطح زمین بوده که بیانگر آن است که هر دو لایه کاملاً اشباع می‌باشد. با معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذپذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل می‌شود و در این مرحله لازم است جابجایی‌ها صفر لحاظ گردد، سپس مدل‌سازی گروه شمع با دو شمع در هر ردیف با طول ثابت ۱۸ متر و با قطرهای ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ متر انجام گردید و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

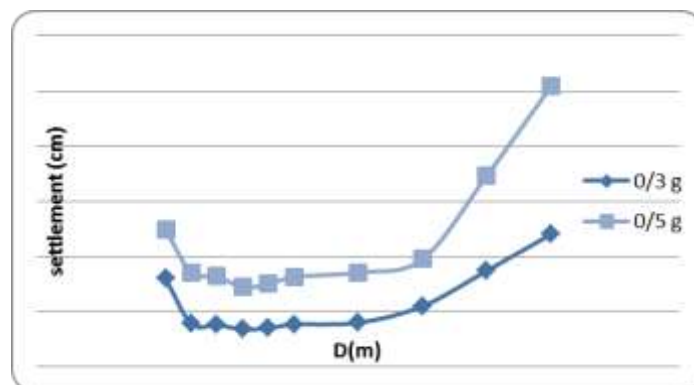
بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی‌ها صفر گردید. در گام بعدی بارگذاری انجام شد (هر شمع ۵۰ کیلو نیوتن) و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل فین جهت اعمال خصوصیات روانگرایی به لایه بالایی که احتمال روانگرایی آن زیاد است تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید سپس پارامترهای زلزله مورد نظر اینجا زلزله کوبه (۱۹۹۵) مورد ارزیابی قرار گرفته است، با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. در این مرحله لازم است جابجایی‌ها صفر لحاظ گردد تا تنها اثر بارگذاری دینامیکی بر تغییرشکل‌ها لحاظ گردد. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله، آنالیز دینامیکی شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جدول ۲ می باشد.

جدول ۲ میزان نشست بیشینه گروه شمع در اثر تغییر قطر

مشخصات حالت	قطر شمع (m) D	طول کل شمع L(m)	طول نفوذ شمع در خاک مترکم l (m)	میزان نشست گروه شمع (mm) شتاب ۰/۳g	میزان نشست گروه شمع (mm) شتاب ۰/۵g
۱	۰/۳	۱۸	۷	مدل ناپایدار	مدل ناپایدار
۲	۰/۴	۱۸	۷	مدل ناپایدار	مدل ناپایدار
۳	۰/۵	۱۸	۷	۱۲۴	۸۰
۴	۰/۶	۱۸	۷	۸۵/۶	۳۹
۵	۰/۷	۱۸	۷	۸۲	۳۸
۶	۰/۸	۱۸	۷	۷۲/۲	۳۴
۷	۰/۹	۱۸	۷	۷۵	۳۵
۸	۱	۱۸	۷	۸۱/۵	۳۸/۵
۹	۱/۲۵	۱۸	۷	۸۵/۵	۴۰
۱۰	۱/۵	۱۸	۷	۹۷/۵	۵۵
۱۱	۱/۷۵	۱۸	۷	۱۷۳	۸۷
۱۲	۲	۱۸	۷	۲۵۴	۱۲۰

پس از آنالیز مدل میزان تنش موثر لایه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است که طیف این تغییرات نشان داده شده است که تنش موثر در لایه اول به صفر نزدیک شده است.

با توجه به اعداد جدول فوق (استخراج شده از نرم افزار) شکل ۱ نمودار نشست گروه شمع بر حسب تغییرات قطر را برای دو شتاب ۰/۳g و ۰/۵g را نشان می‌دهد.



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

شکل ۱ نمودار نشست گروه شمع بر حسب تغییرات قطر

۳-۱-۲- بررسی حالت اثر افزایش تعداد شمع در هر ردیف (میزان بارکل ثابت)

جهت مدلسازی در فضای نرم افزار FLAC2D از دولایه خاک ماسه‌ای با مشخصات زیر استفاده شده است. لایه اول از جنس ماسه سست با تراکم نسبی ۴۰٪ و دارای ضخامت ۱۰ متر می‌باشد. و لایه دوم از جنس ماسه متراکم با تراکم نسبی ۸۰٪ و ضخامت ۱۰ می‌باشد. مشخصات ماسه سست و متراکم اشباع استفاده در فوق در جدول (۳-۱) آمده است. همچنین تراز آب زیرزمینی تا سطح زمین بوده که بیانگر آن است که هر دو لایه کاملاً اشباع می‌باشد. با معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذپذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل می‌شود و در این مرحله لازم است جابجایی‌ها صفر لحاظ گردد، سپس مدلسازی گروه شمع با ۲، ۳، ۴ و ۵ شمع در هر ردیف با طول ثابت ۱۹ متر و با قطر ۰/۶ متر و با فاصله بهینه انجام گردید و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی‌ها صفر گردید تا اثر هر مرحله از تغییرات جداگانه بررسی گردد. در گام بعدی بارگذاری انجام شد (بارهای متغییر که مجموع بارهای وارده ثابت و به میزان ۱۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد) و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل جهت اعمال خصوصیات روانگرایی به لایه بالایی که احتمال روانگرایی آن زیاد است تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید گردید. سپس پارامترهای زلزله مورد نظر، اینجا زلزله کوبه (۱۹۹۵) مورد ارزیابی قرار گرفته است، با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله، آنالیز دینامیکی انجام شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳ میزان نشست بیشینه گروه شمع در اثر افزایش تعداد شمع در هر ردیف

مشخصات حالت	تعداد شمع در ردیف	قطر شمع (m)	طول شمع (m)	میزان نشست گروه شمع (mm) ۰/۳g	میزان نشست گروه شمع (mm) شتاب ۰/۵g
۱	۲	۰/۶	۱۹	۳۵	۷۵/۶
۲	۳	۰/۶	۱۹	۳	۵۷/۵
۳	۴	۰/۶	۱۹	۲۳/۷	۴۲/۳
۴	۵	۰/۶	۱۹	۱۸/۷	۳۱/۷

با توجه به اعداد جدول فوق (استخراج شده از نرم افزار) نشست گروه شمع بر حسب افزایش تعداد شمع در هر ردیف را برای دو شتاب ۰/۳g و ۰/۵g را نشان می‌دهد.

۴-۱-۲- بررسی حالت نشست گروه شمع در یک لایه خاک نیمه متراکم

در این حالت از یک لایه خاک ماسه‌ای با درصد تراکم ۵۰٪، ۵۵٪ و ۶۰٪ و ضخامت ۲۰ متر استفاده شده است که کاملاً اشباع می‌باشد. سپس مشخصات ماسه نیمه متراکم و اشباع مطابق جدول ۳-۱ به مدل وارد شد. برای ایجاد حالت اشباع کامل سطح آب در تراز زمین در نظر گرفته شد. پس از معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذپذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل شد و در این مرحله جابجایی‌ها صفر گردید، سپس مدلسازی گروه شمع با ۲ شمع در هر ردیف با قطرهای ۰/۸، ۰/۹ و ۱ متر و طول‌های ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ متر با فاصله بهینه انجام گردید و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی‌ها صفر گردید تا اثر هر مرحله از تغییرات جداگانه بررسی گردد. در گام بعدی بارگذاری انجام شد (هر شمع ۵۰ کیلو نیوتن)

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

نیوتن) و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل فین جهت اعمال ویژگی روانگرایی به لایه خاک تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید سپس پارامترهای زلزله مورد نظر که در این جا زلزله کوبه (0/3g) می باشد با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله، آنالیز دینامیکی شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جدول 4 می باشد.

جدول 4 میزان نشست بیشینه گروه شمع در یک لایه خاک نیمه متراکم (با تراکم متوسط)

میزان بیشینه نشست گروه شمع (mm) تراکم 60%	میزان بیشینه نشست گروه شمع (mm) تراکم 55%	میزان بیشینه نشست گروه شمع (mm) تراکم 50%	طول شمع (m)	قطر شمع (m)	مشخصات / حالت
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	10	0/8	1
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	12/5	0/8	2
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	15	0/8	3
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	17/5	0/8	4
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	10	1	5
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	12/5	1	6
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	15	1	7
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	17/5	1	8
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	10	1/2	9
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	12/5	1/2	10
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	15	1/2	11
ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	17/5	1/2	12

2-1-5- بررسی حالت نشست گروه شمع در یک لایه خاک نیمه متراکم با طول های مختلف نفوذ در خاک متراکم در این حالت از یک لایه خاک ماسه ای با درصد تراکم 50٪، 55٪ و 60٪ وضخامت 20 متر بر روی یک لایه ماسه متراکم 80٪ (برای نفوذ شمع ها در آن) با ضخامت 10 متر، استفاده شده است که کاملاً اشباع می باشد. سپس مشخصات ماسه نیمه متراکم، متراکم و اشباع مطابق جدول (3-1) به مدل وارد شد. برای ایجاد حالت اشباع کامل سطح آب در تراز زمین در نظر گرفته شد. پس از معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذ پذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل شد و در این مرحله جابجایی ها صفر گردید، سپس مدلسازی گروه شمع با 2 شمع در هر ردیف با قطرهای 0/8، 0/9 و 1 متر و طول های 22، 23، 24 و 25 متر با فاصله بهینه انجام گردید که به ترتیب 1، 2، 3 و 4 متر در لایه متراکم نفوذ کرده اند و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی ها صفر گردید تا اثر هر مرحله از تغییرات جداگانه بررسی گردد. در گام بعدی بارگذاری انجام شد (هر شمع 50 کیلو نیوتن) و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل فین جهت اعمال ویژگی روانگرایی به لایه خاک تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید سپس پارامترهای زلزله مورد نظر که در این جا زلزله کوبه (0/3g) می باشد با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله، آنالیز دینامیکی شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جدول 5 می باشد.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جدول ۵ میزان نشست بیشینه گروه شمع با طول نفوذهای مختلف در خاک متراکم

میزان بیشینه نشست گروه شمع (m) تراکم %۶۰	میزان بیشینه نشست گروه شمع (m) تراکم %۵۵	میزان بیشینه نشست گروه شمع (m) تراکم %۵۰	طول نفوذ شمع در خاک متراکم (m)	طول شمع (m)	قطر شمع (m)	مشخصات / حالت
۲/۲۱	۲/۳	۲/۵	۱	۲۲	۰/۸	۱
۲/۰	۲/۰۸	۲/۱۸	۲	۲۳	۰/۸	۲
۱/۰۹	۱/۱۶	۱/۲۳	۳	۲۴	۰/۸	۳
۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۷۲	۴	۲۵	۰/۸	۴
۲/۰۳	۲/۱۳	۲/۲۵	۱	۲۲	۱	۵
۱/۲۹	۱/۳۶	۱/۴۵	۲	۲۳	۱	۶
۰/۹۸	۱/۰۶	۱/۱۶	۳	۲۴	۱	۷
۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۶۶	۴	۲۵	۱	۸
۱/۴۶	۱/۵۱	۱/۶۰	۱	۲۲	۱/۲	۹
۰/۸۸	۰/۹۵	۱/۰۳	۲	۲۳	۱/۲	۱۰
۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۱۹	۳	۲۴	۱/۲	۱۱
۰/۰۴۵	۰/۰۷۳	۰/۱۲	۴	۲۵	۱/۲	۱۲

۲-۱-۶- بررسی حالت تغییر آرایش گروه شمع و اثر آن بر نشست گروه شمع

در این حالت از یک لایه خاک ماسه‌ای سست با درصد تراکم، ۴۰٪ و ضخامت ۱۰ متر بر روی یک لایه ماسه متراکم با درصد تراکم ۸۰٪ و ضخامت ۲۰ متر استفاده شده است که کاملاً اشباع می‌باشد. سپس مشخصات ماسه سست، متراکم و اشباع مطابق جدول ۳-۱ به مدل وارد شد. برای ایجاد حالت اشباع کامل سطح آب در تراز زمین در نظر گرفته شد. پس از معرفی شتاب گرانش، ضریب نفوذپذیری و شرایط تکیه گاهی، مدل در حالت میدان آزاد تحلیل شد و در این مرحله جابجایی‌ها صفر گردید، سپس مدلسازی گروه شمع با ۳ شمع در هر ردیف با قطر ۰/۸ متر و طول‌های متغییر و آرایش متفاوت با فاصله بهینه انجام گردید بطوریکه حجم مصالح مصرفی ثابت باشد و مشخصات و پارامترهای اندرکنش خاک - شمع به مدل وارد شد و مدل بدون بارگذاری و فقط تحت وزن شمع مجدداً تحلیل شد، سپس در مرحله بعدی میزان جابجایی‌ها صفر گردید تا اثر هر مرحله از تغییرات جداگانه بررسی گردد. در گام بعدی بارگذاری به شکل متغییر انجام شد و مدل تحت بارهای وارده آنالیز شد سپس مدل فین جهت اعمال ویژگی روانگرایی به لایه خاک تخصیص داده شد و مدل تحلیل شد. بعد از آن پارامترهای آنالیز دینامیکی تنظیم گردید سپس پارامترهای زلزله مورد نظر که در این جا زلزله کوبه (۰/۳g) می‌باشد با اصلاحات مربوطه به مدل اعمال گردید. و بعد از مرز بندی مدل تحت زمان زلزله، آنالیز دینامیکی شد. میزان بیشینه نشست گروه شمع مطابق جداول ۶ الی ۸ می‌باشد.

جدول ۶ میزان نشست تفاضلی و بیشینه گروه شمع با آرایش مختلف (توزیع بار یکنواخت)

مشخصات / حالت	قطر شمع (m)	آرایش و مقدار بار به هر شمع (ton)	آرایش و طول هر شمع (m)	نشست تفاضلی (cm)	بیشینه نشست (cm)
۱	۰/۸	۵۰-۵۰-۵۰	۱۷-۱۷-۱۷	۱/۲۸	۷/۸۶
۲	۰/۸	۵۰-۵۰-۵۰	۱۴/۵-۲۲-۱۴/۵	۰/۸	۵/۲

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

۱/۰۰	۰/۰۸	۱۲/۵-۲۶-۱۲/۵	۵۰-۵۰-۵۰	۰/۸	۳
۶/۶	۱/۴۳	۱۹-۱۳-۱۹	۵۰-۵۰-۵۰	۰/۸	۴
۵/۴۰	۰/۸	۲۰/۲۵-۱۰/۵-۲۰/۲۵	۵۰-۵۰-۵۰	۰/۸	۵

جدول ۷ میزان نشست تفاضلی و بیشینه گروه شمع با آرایش مختلف (تمرکز بار در وسط)

مشخصات حالت	قطر شمع (m)	آرایش و مقدار بار به هر شمع (ton)	آرایش و طول هر شمع (m)	نشست تفاضلی (cm)	بیشینه نشست (cm)
۱	۰/۸	۳۷/۵-۷۵-۳۷/۵	۱۷-۱۷-۱۷	۱/۲۹	۸/۳۲
۲	۰/۸	۳۷/۵-۷۵-۳۷/۵	۱۴/۵-۲۲-۱۴/۵	۱/۰۳	۵/۴۲
۳	۰/۸	۳۷/۵-۷۵-۳۷/۵	۱۲/۵-۲۶-۱۲/۵	۰/۷۲	۰/۷۳
۴	۰/۸	۳۷/۵-۷۵-۳۷/۵	۱۹-۱۳-۱۹	۱/۱۷	۶/۲
۵	۰/۸	۳۷/۵-۷۵-۳۷/۵	۲۰/۲۵-۱۰/۵-۲۰/۲۵	۰/۹	۵/۵

جدول ۸ میزان نشست تفاضلی و بیشینه گروه شمع با آرایش مختلف (تمرکز بار در گوشه ها)

مشخصات حالت	قطر شمع (m)	آرایش و مقدار بار به هر شمع (ton)	آرایش و طول هر شمع (m)	نشست تفاضلی (cm)	بیشینه نشست (cm)
۱	۰/۸	۶۰-۳۰-۶۰	۱۷-۱۷-۱۷	۱/۱۳	۸/۰۱
۲	۰/۸	۶۰-۳۰-۶۰	۱۴/۵-۲۲-۱۴/۵	۰/۸۸	۶/۰۰
۳	۰/۸	۶۰-۳۰-۶۰	۱۲/۵-۲۶-۱۲/۵	۰/۱	۰/۹۷
۴	۰/۸	۶۰-۳۰-۶۰	۱۹-۱۳-۱۹	۱/۱۸	۶/۵۲
۵	۰/۸	۶۰-۳۰-۶۰	۲۰/۲۵-۱۰/۵-۲۰/۲۵	۱/۴۴	۵/۶۹

۳- نتیجه گیری

با توجه به مدلسازی‌های ارائه شده که با فرض دولایه ماسه اشباع با مشخصات جدول (۱-۳) بوده است می‌توان با تغییر قطر شمع، طول شمع، عمق نفوذ شمع، میزان تغییرات نشست را بدست آورد و با میزان نشست مجاز مقایسه نمود. و در نتیجه میزان طول و قطر بهینه را در این نوع خاک‌های ماسه‌ای بدست آورد. همچنین مقدار نشست گروه شمع را با دو آریانس مختلف زلزله کوبه (۱۹۹۵) $0.3g$ و $0.5g$ را با هم مقایسه نمود. با توجه به بررسی لایه‌های ماسه نیمه متراکم اشباع مشاهده شد که این گونه خاک‌ها نیز مانند لایه‌های سست در مقابل روانگرایی مطمئن به نظر نمی‌رسند. در ادامه مشاهده شد با یک تغییر چیدمان در شمع‌ها در یک گروه با حجم ثابت مصالح مصرفی، می‌توان میزان نشست را کاهش داد. که این موارد در مدلسازی‌ها ارائه شده است. جهت صحت سنجی و اعتبار بخشی به مدل‌ها با شبیه‌سازی آزمایش سانتریفیوژ که توسط ویلسون و همکاران بر روی ماسه نودا صورت گرفته، با نتایج به دست آمده توسط FLAC2D مقایسه انجام شده است که در فصل سوم به آن اشاره گردید.

برای یک گروه شمع، مشاهده شد هرچه طول شمع افزایش پیدا کند میزان نشست گروه شمع کاهش می‌یابد.

برای یک گروه شمع، مشاهده شد میزان نشست با آریانس $0.5g$ بیش از دو برابر میزان نشست با آریانس $0.3g$ است.

برای یک گروه شمع، مشاهده شد با افزایش قطر ابتدا نشست کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد، که بهینه قطر گروه شمع



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در خاک ماسه‌ای متراکم، در محدوده ۰/۷ الی ۰/۹ متر می‌باشد. برای یک گروه شمع متکی در ماسه متراکم، مشاهده شد هرچه تعداد شمع در ردیف گروه بیشتر شود (با میزان بار کل ثابت) میزان نشست کاهش می‌یابد و این تغییرات تقریباً خطی به نظر می‌رسد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که قرار دادن گروه شمع در ماسه سست و نیمه متراکم با درصد تراکم ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درصد، در هنگام روانگرایی ناپایداری را به دنبال خواهد داشت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در اثر قرار دادن گروه شمع در لایه زیرین که ماسه متراکم می‌باشد پایداری را در مقابل روانگرایی به دنبال خواهد داشت. مشاهده شد میزان نشست با طول نفوذ در لایه متراکم رابطه معکوس دارد. هرچه طول نفوذ بیشتر باشد نشست کمتر خواهد شد. برای یک گروه شمع قرار گرفته در ماسه متراکم، با تمرکز یکنواخت بارگذاری، تمرکز بار در وسط و تمرکز بار در گوشه‌ها، مشاهده می‌شود که تاثیر چیدمان شمع‌ها چشمگیر بوده در حدی که بطور میانگین ۲۵٪ کاهش نشست بیشینه وجود دارد. با توجه به نشست کاسه‌ای با افزایش تمرکز بار در وسط، تاثیر چیدمان محسوس تر مشاهده گردید (در حدود ۳۵٪) که این نشان دهنده اهمیت چیدمان در فونداسیون‌ها با تمرکز بار در وسط می‌باشد. همچنین در هر سه حالت اثر چیدمان بر نشست تفاضلی قابل ملاحظه است. و این نشان دهنده این است که چیدمان جهت رسیدن به محدوده مجاز نشست تفاضلی بسیار کار آمد خواهد بود.

مراجع

۱. فخاریان، ک، اسلامی، الف، «ظرفیت باربری محوری شمع‌ها»، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۴.
۲. مصطفی زاده، رئوف، اونق، مجید، "ارزیابی پتانسیل بروز خطر روانگرایی در دشت های جنوبی گرگانرود استان گلستان"، پژوهش های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۹۳، ۱۰-۱۳۹۰.
- ۳- میرحسینی، س م، «دینامیک خاک»، موسسه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۲.
4. Abdoun, T., Dobry, R., (2003), "Pile Response to Lateral Spreads", Centrifuge Modeling. ASCE 129(10):869[31]
5. Abdoun, T., Dobry, R., O'Rourke, T.D., (1997), "Centrifuge and Numerical Modelling of Soil-Pile Interaction During Earthquake Induced Soil Liquefaction and Lateral Spreading", Observation and Modelling in Numerical Analysis and Model Tests in Dynamic Soil-Structure Interaction Problems, Proceedings of sessions held in conjunction with Geo-Logan'97, Logan, Utah, pp. 76-90[27]
6. Abdoun, T., Dobry, R., Zimmie, T.F., (2005), "Centrifuge Research of Countermeasures to Protect Pile Foundations Against Liquefaction-Induced Lateral Spreading", Journal of Earthquake Engineering, Vol.9, Special Issue 1, pp105-125[10]
7. Abdoun, T., Dobry, R., (2002), "Evaluation of pile foundation response to lateral spreading", Soil Dyn Earthquake Eng 22:1051-1058[9]
8. Bhattacharya, S., Dash, S.R., Adhikari, S., (2008), "On the Mechanics of Failure of Pile-Supported Structures in Liquefiable Deposits During Earthquakes", Current Science, Vol.94, No.5, pp 605-611[13]
9. Bhattacharya, S., (2003), "Pile Instability During Earthquake Liquefaction", Ph.D. Thesis, University of Cambridge, Cambridge, U.K[14]
10. Carvajal, J.C., Taboada-Urtuzuastegui, V.M., Romo, M.P., (2002), "Influence of Earthquake Frequency Content on Soil Dynamic Properties at CAO Site", Soil Dyn, Earthquake Eng., 22, 297-308[19]
11. Cheng, Z., Jeremic, B., (2009), "Numerical Modeling and Simulation of Pile in Liquefiable Soil", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 29, 1405-1416[33]
12. Dash, S., Bhattacharya, M., (2007), "Criteria for Design of Piled Foundation in Seismically Liquefiable Deposits", 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 25-28, paper No.1724[15]



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

13. Dobry, R., Taboada, V., Liu, L., (1995), "Centrifuge Modelling of Liquefaction Effects During Earthquakes", Proceedings, First Conference on Earthquake Geotechnical Engineering", Tokyo, pp. 1291–1324[26]
14. Finn, W.D.L., Fujita, N., (2002), "Piles in Liquefaction Soils, Seismic Analysis and Design Issues", Soil Dyn Earthquake Eng 22:731–742[7]
15. Haldar, S., Babu, G.L.S., (2010), "Failure Mechanisms of Pile Foundation in Liquefiable Soil: Parametric Study", International Journal of Geomechanics, ASCE, 10:2(74) [16]
16. Hamada, M., (1992), "Large Ground Deformations and Their Effects on Lifelines: 1964 Niigata Earthquake", In: O'Rourke TD, Hamada M (eds). Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Japanese Case Studies, Vol. 1:3:1–3:123 [Chapter 3]. [18]
17. Han-Long, L., Yu-Min, C., Nan, Z., (2008), "Development Technology of Rigidity-Drain Pile and Numerical Analysis of its Anti-Liquefaction Characteristics", J. Cent. South Uni. Technol. 15(s2): 101-107[37]
18. Horikoshi, K., Tateishi, A., Fujiwara, T., (1998), "Centrifuge Modeling of a Single Pile Subjected to Liquefaction-Induced Lateral Spreading", Soils Found., (Special Issue No. 2, 193–208[28]
19. Ishihara, K., (1985), "Stability of Natural Deposits During Earthquake", Proceedings of the 11th World International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol.2, pp 321-376[4]
20. Japanese Road Association (JRA)., (1996), "Specification for Highway Bridges", part. V: Seismic Design. JRA, Tokyo[12]
21. Kagawa, T., Minowa, C., Abe, A., Oda, S., (1995), "Shaking Table Test and Analysis of Piles in Liquefying Sands", Earthquake Geotechnical Engineering Proceeding of the First International Conference, IS- Tokyo, 95, p.699-704[34]
22. Klar, A., Frydman, S., Baker, R., (2004), "Seismic Analysis of Infinite Pile Group in Liquefiable soil", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 24, 565-575[32]
23. Klar, A., Baker, R., Frydman, S., (2004), "Seismic Soil- Pile Interaction in Liquefiable Soil", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 24, 551-564[36]
24. Kostadinov, M.V., Towhata, I., (2002), "Assessment of Liquefaction Inducing Peak Ground Velocity and Frequency of Horizontal Ground Shaking at Onset of Phenomenon, Soil Dyn", Earthquake Eng., 22, 309–322[20]
25. Kramer, S.L., (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, 653p. [3]
26. Liyanapathirana DS, Poulos HG, (2005), "Seismic Lateral Response of Piles in Liquefying Soil", International Journal of Geomechanics, ASCE, 131(12):1466–1479[17]
27. Mizuno, H., Sugimoto, M., Mori, T., Iiba, M., Hirade, T., (2000), "Dynamic Behaviour of Pile Foundation in Liquefaction Process Shaking Table Tests Utilising Big Shear Box", Proceedings, 12th World Conference on Earthquake Engineering", Auckland, New Zealand, Paper No. 1883[24]
28. Nakamura, T., Sugano, T., Oikawa, K., Mito, M., (2000), "An Experimental Study on the Pier Damaged by 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake", Proceedings, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 1038[25]
29. Ohtomo, K., (1996), "Effects of Liquefaction Induced Lateral Flow on a Conduit with Supporting Piles", Proceedings, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 386[21]
30. Puri, V.K., Prakash, S., (2008), "Pile Design in Liquefying Soil", The 14th World Conference on Earthquake Engineering", Beijing, China[8]
31. Sakajo, S., Chai, J.C., Nakajima, K., Maedam, M., (1995), "Effect of Group pile on Liquefaction Resistance of Sandy Ground", Earthquake Geotechnical Engineering Proceeding of the first International Conference, IS- Tokyo, 95, p.755-760[35]
32. Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M., (1985), "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 111, No.12, pp 1425-1445[5]
33. Tamura, S., Suzuki, Y., Tsuchiya, T., Fujii, S., Kagawa, T., (2000), " Dynamic Response and Failure Mechanisms of a Pile Foundation During Soil Liquefaction by Shaking Table Test with a Large Scale Laminar Shear Box", Proceedings, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 0903[22]
34. Tomlinson, M.T., (1994), "Pile Design and Construction Practice", E & FN Spon, Fourth Edition. [6]



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

35. Tokimatsu, K., Mizuno, H., Kakurai, M., (1996), "Building Damage Associated with Geotechnical Problems", Soils Found", Special Issue 1, January, 219–234[11]
36. Wilson, D.W., Boulanger, R.W., Kutter, B.L., (1999), "Lateral Resistance of Piles in Liquefying Sand", Geotechnical Special Publication no. 88, Proceedings, Analysis, Design, Construction and Testing of Deep Foundations, ASCE, Reston, pp. 165–179[29]
37. Wilson, D.W., Boulanger, R.W., Kutter, B.L., (2000), "Observed Seismic Lateral Resistance of Liquefying Sand. J. Geotech", Geoenviron. Eng 126(10):898–906[30]
38. Yasuda, S., Ishihara, K., Morimoto, I., Orense, R., Ikeda, M., Tamura S., (2000), "Large-Scale Shaking Table Tests on Pile Foundations in Liquefied Ground, Proceedings, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland", New Zealand, Paper No. 1474[23]