پیاپی ۱۰۲

ارزیابی آزمایشگاهی ظرفیت باربری و نشست پیهای باکت در خاکهای روانگرا

عبدالحسين حداد* و رضا اميني آهي دشتي

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان ^۲ دانشآموخته دکترای دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۹۶/۱۱/۲۳، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

چکیدہ

افزایش تقاضا برای انرژی باد در نواحی فراساحلی و گسترش استفاده از توربینهای بادی فراساحلی در مناطق لرزه خیز، نیاز به توجه ویژهای در انتخاب پی مناسب و شناخت رفتار آن دارد. وقوع روانگرایی در خاکهای ماسهای در مناطق لرزه خیز، موجب خسارتهای سازهای متعددی همانند نشستهای اضافی و گسیختگی ناشی از کاهش ظرفیت باربری میشود. پیهای باکت نوعی پی صندوقه ای مکشی نوین میباشند که در طی دو دهه گذشته به عنوان فونداسیون توربینهای بادی فراساحلی مورد استفاده قرار گرفتهاند. در این پژوهش، رفتار پیهای باکت تحت بار قائم در خاکهای روانگرا، با روش مدلسازی فیزیکی در شرایط تراوش رو به بالا مطالعه گردید. نتایج این تحقیق نشان میدهد در اثر افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پی کاهش می یابد، اما حتی در شرایط تراوش رو به بالا مطالعه گردید. نتایج این تحقیق نشان میدهد در اثر افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پی کاهش می یابد، اما حتی در شرایط تراوش رو به بالا مطالعه گردید. نتایج این تحقیق نشان می در اثر افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پی کاهش می یابد، اما حتی در شرایط روانگرایی کامل نیز پیها دارای ظرفیت باربری قابل توجهی هستند. پیهای باکت در مقایسه با پی سطحی از افز اطراف دارند، تراکم خاک درون و زیر پی باکت را بهبود می بخشد. به همین علت، در شرایط روانگرایی پیهای باکت در مقایسه با پی سطحی از افت ظرفیت باربری کم تری برخوردارند. همچنین به دلیل وجود لبهها در اطراف پی باکت، عملکرد پی در مقایسه با پی سطحی بهبود یافته و دامنه نشست کاهش می یابد.

کلیدواژدها: پی باکت، نشست ناشی از روانگرایی، ظرفیت باربری، مدلسازی فیزیکی، تراوش رو به بالا.

۱– مقدمه

با افزایش تقاضای انرژی در سطح جوامع و از سوی دیگر محدودیت منابع سوختهای فسیلی، بهرهبرداری از انرژیهای تجدیدپذیر همانند باد، خورشید و زمین گرمایی رو به گسترش است. منابع انرژی باد نامحدود هستند و جزء انرژیهای پاک به شمار میآیند. امروزه توربینهای بادی مدرن میتوانند انرژی تجدیدپذیر اقتصادی، قابل اطمینان و بدون آلایندگی تولید کنند. بهمنظور استحصال انرژی باد با راندمان بالا، توربینهای بادی در مناطق ساحلی و فراساحلی بادخیز نصب میشود (Houlsby

سازههای توربینهای بادی فراساحلی بهطور معمول روی پیهای پایه وزنی^۱ و یا شمعهای تکی^۲ احداث میشوند. شکل (۱) انواع پیهای توربینهای بادی فراساحلی نشان میدهند. یکی از انواع پیهای سطحی که در مناطق فراساحلی و در صنایع نفت و گاز و انرژی کاربرد فراوانی دارد پی باکت است. استفاده از پی

.(٢٠٠٣

ای[†] است که به علت استفاده از مکش در عملیات نصب آن، پی صندوقهای مکشی^۵ نیز مینامند (Houlsby و ۲۰۰۳. جنس مصالح پی باکت معمولاً از نوع فولاد است و به شکل سطل وارونه در محل نصب میشود. تفاوت اصلی پی باکت با پی سطحی مسطح، وجود لبههایی (Skirt) در اطراف آن است که مملکرد و باربری آن را در قیاس با پی سطحی بهبود میبخشد (۲۰۱۷ و Barari ؛ ۲۰۱۳، Eid ؛ ۱۹۹۹ و همکاران، ویصد هزینه تمامشده مجموعه روسازه و پی را شامل میشود. از اینرو طراحی پی اقتصادی بسیار حائز اهمیت بوده و توجه بسیاری از محققین را به سمت خود معطوف کرده است (Kelly و همکاران،

باکت^۳ طی دو دهه گذشته در مناطق فراساحلی بهویژه برای پی

توربین های بادی گسترشیافته است. پی باکت نوعی پی صندوقه-

^{1.} Gravity base

Monopile
 Bucket foundation

^{5.} Ducket foundation

^{4.} caisson

^{5.} Suction caisson

^{*} نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۳۳۶۵۴۱۲۱–۲۲

آدرس ایمیل: haddad@semnan.ac.ir (ع. حداد)، r.amini@semnan.ac.ir (ر. امینی آهیدشتی).



شکل ۱- انواع مختلف پیهای توربین بادی در مناطق فراساحلی در اعماق مختلف آب: الف) پی جکت ٌ، ب) پی شمع تکی^۷، ج) پی باکت[^]، د) پی پایه وزنی ^۴ (Barari و Ibsen) ۲۰۱۴

تاکنون رفتار پی باکت تحت بارگذاری قائم و بارگذاری کلی نیروهای استاتیکی بررسی و تحقیق شده است (Byrne و Gourvenec ،۲۰۰۶ ،Villalobos ،۲۰۰۴ ، و ممکاران Ibsen ،۲۰۰۷ و ممکاران، ۲۰۱۴) و مدلهای رفتاری برای ارائه رفتار آن تحت بارگذاری کلی ارائه گردید. بررسی رفتار دینامیکی این نوع پیها نیز در حال تحقیق و پژوهش میباشد و مقالات متعددی در زمینه رفتار دینامیکی پی باکت منتشر شده است (۲۰۱۸ و همکاران، ۲۰۱۳؛ Foglia و همکاران ۲۰۱۵).

افزایش کاربرد پی باکت و اجرای آن در مناطق آسیایی و آمریکای شمالی که اغلب مناطق لرزهخیر و پرمخاطره هستند، مسائل و مشکلات جدیدی به همراه آورده است. یکی از مهم ترین مخاطرات ژئوتکنیکی لرزهای در مناطق لرزهخیز، وجود خاکهای مستعد روانگرایی است. روانگرا شدن خاکها، رفتار بسیاری از سازهها را تحت تأثیر قرار داده و خسارات سنگینی به سازه و پی وارد میکند. آنچه در این تحقیق مورد پرسش قرار گرفته است، بررسی رفتار و عملکرد پی باکت در خاکهای روانگرا و مکانیسمهای ایجاد نشست می باکت در خاکهای روانگرا و خاکهای روانگرا تاکنون مورد بحث و تحقیق جامعی قرار نگرفته باربری پی باکت و ارزیابی میزان نشست و دوران پی باکت در باربری پی باکت و ارزیابی میزان نشست و دوران پی باکت در خاکهای روانگرا و تأثیر آن بر عملکرد سیستم روسازه با اهمیت بوده و نیاز به تحقیق و بررسی بیشتر دارد.

۲- رفتار پی سطحی در خاکهای روانگرا

خاکهای ماسهای با تراکم کم و اشباع، تحت تأثیر تحریکات لرزهای ممکن است بخش زیادی از باربری خود را از دست دهند و کاهش حجم شدیدی را تجربه کنند. با کاهش حجم خاک، فشار آب منفذی افزایش می ابد که منجر به کاهش نیروی میان ذرات خاک می شود که کاهش مقاومت خاک را در پی خواهد داشت (صاحب کرم علمداری و نجفی، ۱۳۹۶).

خرابیهای وسیع ناشی از تغییر شکلهای حاصل از روانگرایی در طی زلزلههای گذشته سبب شده است تا این پدیده به یکی از مهمترین و پیچیدهترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک لرزهای تبدیل شود. مهمترین مخاطرات روانگرایی خاک عبارتاند از: نشست زمین، کاهش مقاومت خاک، گسترش جانبی، فروریزی شیبها و گسیختگی دیوار حائل (Kramer).

مهندسی مدرن اولین بار نشست پی سطحی در اثر روانگرایی خاکهای نرم را پس از زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا^{۱۰} ژاپن گزارش نمود. در طول این زلزله تعداد زیادی از ساختمانها در اثر روانگرایی خاکها آسیب دیدند. آسیبهای وارده به ساختمانها در مناطق روانگرا شامل نشست، گسیختگی باربری و حرکت جانبی ساختمانها بوده است. در ژاپن و شهر Dagupan فیلیپین (زلزله لوزان ۱۹۹۰) اغلب ساختمانها دو تا چهار طبقه روی پیهای سطحی و لایه ضخیمی از ماسه تمیز مستقر بودند. در این موارد نشست ساختمانها متناسب با عرض ساختمانها بود. فشار محصورکننده و تنش برشی ناشی از سربار ساختمانها و سازههای مجاور بر جابهجایی ساختمانها مؤثر بودند (Tokimatsu).

اثر عرض پی بر نشست متوسط ساختمانهای مستقر بر خاک روانگرا، اولین بار توسط Syoshimi و Yoshimi (۱۹۷۷) پس از زلزله ۱۹۶۴ نیگاتای ژاپن تشخیص داده شد و سپس با یافتههای زلزله ۱۹۶۴ لوزان گسترش یافت (Adachi و همکاران ۱۹۹۲). براساس دادههای شواهد تاریخی زلزلههای نیگاتا ۱۹۶۴ و لوزان ۱۹۹۰، نموداری برای محدوده نشست ساختمانها با توجه به اندازه عرض ساختمان ارائه کردند. این منحنی دارای دو کران بالا و پایین است که حداکثر و حداقل نشست ممکن در اثر روانگرایی نشان میدهد (In و روانگرایی اندازه عرض ساختمان ارائه کردند. این منحنی دارای دو کران بالا و پایین است که حداکثر و حداقل نشست ممکن در اثر روانگرایی نشان میدهد (In و روانگرایی سانتریفیوژ^{۱۱} (In و برای نشان میده از مای و آزمایشهای سانتریفیوژ^{۱۱} (In و برای کنواخت اشباع از ماسه تمیز استفاده نمودهاند (Ins و Yoshimi) یکنواخت اشباع از ماسه تمیز استفاده نمودهاند (Ins و Voshimi) یکنواخت اشباع از ماسه تمیز استفاده مودهاند (Ins و Voshimi) یکنواخت اشباع از ماسه تمیز استفاده مودهاند (Ins و Voshimi)

12. Sediment

6. Jacket

- 8. Bucket foundation
- 9. Gravity base

^{10.} Niigata

^{11.} Centrifuge

^{7.} Monopile

Liu و Dobry (۱۹۹۷) گزارش کردند روانگرایی کامل (1-ru) زیر ساختمانها مشاهده نشد و فشارهای آب منفذی اضافی کم-تری در مقایسه با میدان آزاد، در زیر پیها به وجود آمد. ایشان این اثر را به پاسخ اتساعی ماسه تحت تنش برشی استاتیکی اولیه ناشی از وزن سازه نسبت دادند.

Dashti و همکاران (۲۰۱۰) مکانیسمهای متعددی برای نشست ساختمان روی خاک روانگرا برشمردند. ایشان مکانیسمهای نشست را به دو بخش کرنش حجمی و کرنش انحرافی تقسیم کردند و سازوکار هر کدام را بهتفصیل شرح دادند. هم بخشی هر کدام از مکانیسمهای نشست در جابهجایی کلی ساختمان بستگی به مشخصات خاک و سازه و ویژگیهای حرکت زمین دارد.

تحقیقات در زمینه رفتار سنجی پیهای تریپاد^{۱۵} و شمعی در خاکهای روانگرا انجامشده است (Dash و همکاران، ۲۰۱۶ Su و همکاران، ۲۰۱۰)، اما گزارشها و مطالعاتی محدودی در زمینه رفتار پی باکت در خاکهای روانگرا وجود دارد (Yu و همکاران، ۲۰۱۴ و همکاران، ۲۰۱۵).

Yu و همکاران (۲۰۱۴) تعدادی آزمایش سانتریفیوژ روی مدلهای توربین بادی با پی صندوقهای مکشی بهمنظور ارزیابی رفتار پی باکت در خاکهای روانگرا انجام دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داده است افزایش قطر پی و افزایش طول لبه پی بیشترین تأثیر در کاهش فشار منفذی را دارند. افزایش طول لبه پی بیشترین تأثیر در کاهش نشست دارد و کمترین تأثیر مربوط به افزایش وزن پی است. وزن بیشتر پی، مقاومت پی در برابر لنگر واژگونی تحت نیروی زلزله افزایش میدهد.

از راهکارهای مهم کاهش نشست پی سطحی در خاک روانگرا بهسازی خاک زیر پی با افزایش تراکم خاک (ذکری و همکاران، ۱۳۹۴) یا استفاده از دیوارههای فولادی در اطراف پی میباشد. پی

13. Taywara

صندوقهای مکشی یا باکت در واقع پی سطحی است که در اطراف آن دیوارهای فلزی یا شیتپایل^{۱۶} وجود دارد. محققین متعددی (Rasouli و همکاران، ۱۹۹۶؛ Dashti و همکاران، ۲۰۱۰؛ Rasouli و همکاران، ۲۰۱۵) اثر شیتپایل بر کاهش نشست پی سطحی در خاک روانگرا بررسی نمودند. آنها در بررسیهای خود نشان دادند شیتپایل با ایجاد مهار جانبی و جلوگیری از تغییر شکل افقی، از نشست نهایی سازه میکاهد. وجود دیواره نسبتاً صلب زیر پی، توزیع تنش در خاک زیرسطحی را تغییر میدهد. این تغییر توزیع تنش موجب تغییر در مد گسیختگی پی به گسیختگی پانچ میشود. نصب دیوار موجب کاهش آب حفرهای میشود و درنتیجه از اندازه نشست میکاهد.

بیشتر تحقیقات در زمینه ارزیابی و برآورد نشستهای پس از روانگرایی پیها معطوف شده است و تحقیقات محدودی در مورد تغییرات ظرفیت باربری پی در اثر روانگرایی خاک انجام شده است (Karamitros و همکاران، ۲۰۱۲؛ Jafarian و همکاران، ۲۰۱۶).

Jafarian و همکاران (۲۰۱۶) با مدلسازی فیزیکی پیهای سطحی و ایجاد تراوش رو به بالا و افزایش فشار آب منفذی، شرایطی مشابه با روانگرایی کامل در خاک به وجود آوردند. ایشان گزارش نمودند در اثر بالا رفتن فشار آب منفذی، مقاومت و سختی خاک کاهش مییابد، اما پیها همچنان دارای ظرفیت باربری قابل توجهی است.

تراوش رو به بالا میتواند شرایط خاک در حین زلزله و روانگرایی به وجود آورد. در این تحقیق، مدلسازی فیزیکی پی های سطحی و پی های باکت در ترازهای مختلف اضافه فشار منفذی انجام شد. آزمون های اضافه فشار منفذی از طریق تراوش روبه بالا ایجاد می گردد و ظرفیت باربری و نشست پی های سطحی و باکت ارزیابی و تحلیل گردید. در این تحقیق اثر کاهش مقاومت خاک روانگرا شده بر ظرفیت باربری پی باکت مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نشست پی باکت ناشی از روانگرایی خاک با استفاده از مدل سازی فیزیکی تحقیق شد.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

رفتار پیهای سطحی در خاکهای روانگرا حین لرزش و پس از لرزش متفاوت می باشد. با عنایت به لزوم استفاده از پیهای باکت در مناطق لرزه خیز، بررسی عملکرد پیهای باکت پس از روانگرایی موضوع حائز اهمیتی بوده که می تواند بر عملکرد کل سازه تأثیر بسزایی داشته باشد. در این مطالعه با مدل سازی فیزیکی پیهای باکت و ایجاد فشار آب در محفظه آزمایش، رفتار پی باکت پس از روانگرایی مورد مطالعه قرار گرفت. این روش توسط محققین

^{14.} Free-Field

۱۵. Tripod

^{16.} Sheetpile

دیگری برای بررسی رفتار پس از روانگرایی با روش بالا رفتن فشار آب منفذی استفاده شد (Calvetti و همکاران، ۲۰۰۴؛ Jafarian و همکاران، ۲۰۱۶).

Calvetti و همکاران (۲۰۰۴) عملکرد لولههای مدفون در خاک را بعد از روانگرایی، با بالا بردن فشار آب مورد تحقیق قرار دادند. در این پژوهش ظرفیت باربری پیهای سطحی و باکت در دو شرایط خاک اشباع و روانگرایی کامل با نسبتهای اضافی فشار آب منفذی ۰ و ۱ ارزیابی شده است. نسبت اضافه فشار منفذی از طريق رابطه (۱) محاسبه مي شود.

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_{v,0}} \tag{1}$$

 σ'_{v0} که r_u نسبت اضافه فشار منفذی، Δu اضافه فشار منفذی و r_u تنش مؤثر قائم اولیه خاک در شرایط میدان آزاد است.

۳-۱- تجهیزات و ابزار آزمایش

بهمنظور مدلسازی فیزیکی رفتار پی باکت در خاکهای دانهای روانگرا، مجموعهای از تجهیزات آزمایشگاهی شامل محفظه آزمایش، سیستم بارگذاری و واحد جمع آوری دادهها آزمایشگاه خاک دانشگاه سمنان استفاده شد. تصویر شماتیک مجموعه آزمایشگاهی در شکل (۲) نمایش دادهشده است. محفظه آزمایش با ابعاد ۹۰×۱۲۰×۹۰ سانتیمتر از جنس فولاد و صلب میباشد. در یک طرف جعبه آزمایش صفحهای از جنس پلکسی گلس شفاف نصب شده است تا رفتار خاک حین بارگذاری قابل مشاهده باشد. همچنین سیستمی در زیر جعبه برای افزایش فشار منفذی تعبیه شده تا در توده خاک اضافه فشار منفذی ایجاد کند. این سیستم شامل لولههای ورود و خروج جریان آب به درون جعبه آزمایش مى باشد كه با پمپاژ آب به درون جعبه، فشار آب افزايش مى يابد و در نتیجه تولید فشار منفذی و تراوش رو به بالا، نسبت اضافه فشار منفذی (*r*u) را افزایش میدهد.



شکل ۲- شمای کلی جعبه آزمایش، سیستم بارگذاری و تراوش رو به بالا

در اثر فشار روبه بالا آب که از زیر نمونه وارد می شود ممکن است خاک دچار آبشستگی شود و توزیع فشار یکنواخت نباشد، ازاینرو به منظور جلوگیری از پدیده آب شستگی خاک، لایهای از شن به ضخامت حداقل ۵ سانتی متر در کف جعبه وجود دارد و روی آن با یک لایه لاستیک مشبک دارای منافذ عبور آب، پوشانده شد. لايه شني و شبكه مشبك روى آن، قابليت عبور آب را دارد و از آب شستگی خاک جلوگیری میکند و توزیع فشار منفذی را یکنواخت میکند. بهمنظور ارزیابی اثر فشار منفذی در ایجاد نشست اضافی زیر پی و کاهش ظرفیت باربری پی، آزمایشها با دو مقدار نسبت اضافه فشار منفذی انجام گردید. از دو عدد خط-کش دیجیتال (LVDT) با ظ_رفیت اندازه گیری ۱۰۰ میلیمتر و دقت ۰/۰۱ میلیمتر برای اندازهگیری نشست پی و برای اندازه گیری نیرو، لود سل^{۱۷}، از نوع S شکل با ظرفیت اسمی حداکثر ۲۰ کیلونیوتن و دقت ۱/۵ نیوتن استفاده گردید. ثبت دادهها توسط دستگاه دیتالاگر^۸ ۸ کاناله AL4-8 صورت پذيرفت.

۲-۳- پیها و مصالح مصرفی

برای مطالعه رفتار دقیق یک مدل، لازم است تا مدل در مقیاس واقعی مورد آزمایش و تحلیل نتایج قرار بگیرد. اما به سبب پرهزینه بودن چنین آزمایشهایی، مدلسازیهای فیزیکی در مقیاس های کوچک انجام می شود. از این رو برای بررسی ظرفیت باربری قائم و نشست پیهای لبهدار در مقیاس آزمایشگاهی، تعدادی پی در مقیاس کوچک ساخته شد. پیهای مورداستفاده در این پژوهش دایرهای شکل بوده و در دو قطر ۱۰ و ۲۰ سانتیمتری و با نسبتهای ارتفاع لبه به قطر پی (بدون بعد) صفر، ۰/۵ و ۱/۰۰ تهیه شد. بدین ترتیب تعداد ۶ عدد پی سطحی و لبهدار که در شکل (۳) نشان دادهشده است برای این پژوهش در نظر گرفته شد. مصالح مصرفی برای مدل کردن محیط خاکی، ماسه بابلسر بوده که از سواحل دریای خزر در شهرستان بابلسر تهیه شده است.

ماسه بابلسر از نوع ماسه بد دانهبندی شده (SP) در طبقهبندی به روش متحد میباشد. مشخصات ماسه بابلسر و نمودار دانهبندی آن به ترتیب در جدول (۱) و نمودار شکل (۴) ارائه شده است. در آزمونهای 1g به جهت بررسی رفتار ماسههای سست در حین روانگرایی لازم است ماسه با تراکم بسیار پایین در مقیاس آزمایشگاهی در محفظه آزمایش انباشته گردد (Towhata، ۲۰۰۸). در این پژوهش از روش غرقاب نمودن ماسه (Lagioia و

17. Load cell



همکاران ۲۰۰۶؛ Wood و همکاران، ۲۰۰۸). برای ساخت محیط خاکی یکنواخت و با تراکم کم بهره گیری شد.



شکل ۴- منحنی دانهبندی ماسه بابلسر

جدول ۱- مشخصات ماسه بابلسر			
۲/۷۳	Gs		
۳۰~۳۵	Dr (%)		
• /٢	D ₅₀		
٠/١۶	D ₁₀		
٠/٧٣	Max void ratio, e _{max}		
۰/۵۴	Min void ratio, e _{min}		

در این روش ابتدا جعبه آزمایش با آب پر شده، سپس ماسه از ارتفاع ۱۰ سانتیمتری سطح آب به داخل محفظه رها میشود. ماسه در اثر وزن خود در آب تهنشین شده و محیط ماسهای یکنواخت و با تراکم در حدود ۳۰ درصدی پدید میآید. این نحوه ایجاد محیط خاکی شباهت فراوانی با رسوبگذاری نهشتههای جوان در طبیعت دارد.

۳-۳- روش آمادهسازی نمونه و انجام آزمایش

چگالی نسبی ماسه با اندازهگیری وزن ماسه ریخته شده و حجم فضای اشغالشده توسط ماسه تعیین گردید. ضخامت ماسه حداقل ۳ برابر عرض بزرگترین پی در نظر گرفته شد تا از تأثیرات شرایط مرزی اجتناب شود. پیها با توجه به شرایط مرزی در وسط محفظه آزمایش مستقر میشوند. پس از تراز نمودن سطح ماسه، پیهای سطحی روی خاک مستقر شدند. برای استقرار پیهای باکت، پیها در وسط محفظه آزمایش قرارگرفته و با فشار هیدرولیکی کمی در موقعیت خود قرار می گیرند. پیها توسط جک هیدرولیکی با سرعت ۵ میلی متر در دقیقه بارگذاری شدند.

۳-۴- اثر مقیاس

هدف این پژوهش، مقایسه رفتار پیها در مقیاس کوچک با یکدیگر، مطالعه روی الگوی گسیختگی پیها و ارزیابی رفتار پی باکت در خاک روانگرا در مقیاس کوچک میباشد. از این رو بررسی اثر مقیاس بر رفتار پی مدل و تأثیر نتایج آن در مدل واقعی بایستی مطالعه و ارزیابی شود.

مدل سازی فیزیکی ابزاری قدرتمند برای ارزیابی رفتار سازههای ژئوتکنیکی است که به دلیل هزینه کم تر و تجهیزات سادهتر، نسبت به آزمایشهای بزرگمقیاس ارجحیت دارند. رفتار پدیدههای ژئوتکنیکی تابع سطح تنش است و در مدل سازی فیزیکی در سطوح تنش پایین 1g نمی تواند تمام عوامل مؤثر بر رفتار خاک را ارزیابی نماید. این پدیده که به عمل اثر مقیاس شناخته می شود در خاکهای دانه ای از اهمیت بیشتری برخوردار است. عوامل متعددی در به وجود آمدن اثر مقیاس نقش دارند که توسط محققین متعددی بحث و بررسی شده است (Salgado و مکاران، ۲۰۱۱ و که ممکاران، ۱۹۹۷؛ کالی و همکاران، ۲۰۰۱؛ Loukidis و که

اختلاف تراز تنش زیر پی مدل و اندازه واقعی و نسبت میان عرض پی و اندازه متوسط دانهها از عوامل اصلی اثر مقیاس است. در نظر گرفتن هر یک از عوامل فوق و کاهش اثر آنها میتواند منجر به نتایجی نزدیکتر به واقعیت شود. با کوچک در نظر گرفتن اندازه متوسط دانهها (D50) نسبت به عرض پی، از تأثیر اثر مقیاس اندازه دانهها میتوان اجتناب کرد. اثر مقیاس ناشی از اختلاف تراز تنش در آزمایشهای سطح تنش پایین وجود دارد.

محققین متعددی روابط مربوط به تحلیل ابعادی آزمایشگاه در شرایط 1g را مورد تحقیق و مطالعه نمودند و نشان دادند بهطورکلی در چنین آزمونهایی شبیهسازی دقیق تغییر شکلهای بزرگ با استفاده از قانون تشابه میسر نخواهد بود (Ial، ۱۹۸۹). به عبارت دیگر در آزمونهای کوچکمقیاس با سطح تنش کم، تعیین رفتار تنش کرنش مرتبط با نمونههای بزرگمقیاس الزامی خواهد

بود، به گونهای که ماسههای شل با سطح تنش مؤثر کم، رفتاری مشابه ماسههای متراکم را از نظر اتساع پذیری^{۱۹} دارند. بهطور کلی رفتار اتساع یذیری ماسه شل در سطح تنش کم در جعبههای 1g معمولاً به رفتار ماسه در شرایط متراکمتر نزدیکتر است. Vargas (۱۹۹۸) با بررسی اثر سطح تنش بر نرمشوندگی تنشها روی ماسه با چگالیهای نسبی و فشارهای مؤثر مختلف، نشان داد نرم-شوندگی کرنش ماسه در سطح تنش پایین ناشی از اتساع ماسه است که وابسته به سطح تنش و چگالی نسبی ماسه میباشد. بر این اساس مفهوم شاخص تردی براساس نتایج آزمونهای برش حلقه روی ماسه تایورا توسط Vargas (۱۹۹۸) ارائه گردید. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است ترکیبهای چگالی نسبی و سطح تنش مؤثر، شاخص تردی مشابهی دارند. بهعبارت دیگر می توان از شکل (۵) مشاهده نمود در شاخص تردی یکسان، وقتی سطح تنش مؤثر ۱۰ برابر کاهش می یابد چگالی نسبی باید حدود ۲۰ درصد کاهش پیدا کند. در این مطالعه شل ترین حالت ماسه بابلسر در جعبه 1g حدود ۳۰ درصد است که متناظر با چگالی نسبی ۵۰ درصد در اندازه واقعی با مقیاس N=10 خواهد بود.



۳–۵– برنامه آزمایشها برنامه آزمایشها شامل ارزیابی ظرفیت باربری پیهای سطحی و باکت در فشارهای منفذی اضافی مختلف می باشد. جدول (۲) برنامه آزمایشهای ارزیابی ظرفیت باربری پیها با ابعاد ۱۰ و ۲۰ سانتیمتری را ارائه میکند. دسته اول آزمونها تحت بارگذاری

19. Dilatancy

استاتیکی بدون فشار آب منفذی اضافی است. دسته دوم آزمونها با ایجاد فشار آب منفذی اضافی، پیها تا رسیدن به باربری نهایی، بارگذاری شدند. بهعبارت دیگر در دسته دوم آزمونها، شرایط خاک پس از روانگرایی را شبیهسازی می کند و هدف از آن، تعیین ظرفیت باربری پیها در خاکهای روانگرا است. اگرچه ممکن است تحریکات لرزهای موجب کاهش مقاومت خاک شود و ظرفیت باربری پی را کاهش دهد، اما همچنان پیها دارای ظرفیت باربری خواهند بود (Jafarian و همکاران، ۲۰۱۶). مطابق با برنامه آزمایشها، پیهای سطحی لبهدار تحت بار قائم بارگذاری شدند و ظرفیت باربری هر یک در ماسه اشباع و ماسه اشباع با تراوش رو به بالا مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- مشخصات برنامه آزمونها

	••••		
r	نسبت ارتفاع لبه به	قطر پی (cm)	شماره
Tu	قطر پی (d/D)	(D)	آزمايش
•	•	۱.	١
•	•/۵	١٠	٢
•	١	١٠	٣
•	•	۲.	۴
•	•/۵	۲.	۵
•	١	۲.	۶
١	•	۱.	٧
١	•/۵	١٠	٨
١	1	۱.	٩
١	•	۲.	١٠
١	•/۵	۲.	11
١	١	۲.	11

۴- نتایج

در این مطالعه، به دلیل تراکم کم خاکهای ماسهای، پیها در مد برشی پانچ دچار گسیختگی شدند و آثاری از بلندشدگی خاک در اطراف پی مشاهده نشد. همچنین در نمودارهای بار - نشست، با افزایش بار میزان نشست افزایش مییابد و نقطه حداکثر^{۲۲} مشخص و واضحی وجود ندارد که مبین رفتار پانچینگ^{۳۲} پی در خاک دارد. Vesic (۱۹۷۳) مشخص نمود پیهای سطحی در خاکهای با تراکم کم (Dr < 0.35) با افزایش بار بدون ایجاد تورم خاک در اطراف پی، به درون خاک فرو می رود و در مد برشی سوراخ شونده گسیخته خواهد شد (شکل (۶)). به منظور تعیین ظرفیت باربری پیها در خاکهای شل که مد گسیختگی آن از نوع برشی یانچ است، وسیک پیشنهاد نمود، نقطهای از منحنی که شيب منحنى تقريباً ثابت مىشود بهعنوان ظرفيت باربرى نهايي در نظر گرفته شود. منحنی های شکل های (۷) و (۸)، نتایج

^{20.} Brittleness Index 21. Relative density

^{22.} Peak

۲۳. Punching

آزمونهای بارگذاری پیهای لبهدار در ماسه شل اشباع را نشان میدهند.



شکل ۶- مد گسیختگی سوراخ شونده پی سطحی و نمودار بار - نشست (Vesic، ۱۹۷۳)



شکل ۷- نمودار بار – نشست پیهای با قطر ۱۰ سانتیمتر



تحقیقات گذشته گزارش نمودند که ظرفیت باربری پی باکت تحت بار قائم کمی کمتر از پی توپر مدفون با عمق مدفون شدگی برابر است (Barari و همکاران ۲۰۱۷؛ Eid، ۲۰۱۳). همچنین نشان داده است که خاک درون پی باکت میتواند صلب یا انعطاف-پذیر فرض شود (Villalobos، ۲۰۰۶). در حقیقت فرض منعطف-پذیر بودن به واقعیت نزدیکتر است، با این وجود Villalobos پذیر بودن به واقعیت نزدیکتر است، با این وجود Villalobos مرابط بارگذاری قائم تأثیر چندانی بر نتایج نخواهد داشت. از اینرو مقایسهای بین مقادیر بار گسیختگی هر آزمون در این تحقیق با برخی روشهای متداول تعیین ظرفیت باربری مانند

(Meyerhof، ۱۹۶۳، ۱۹۷۹، ۱۹۹۰؛ Martin، ۲۰۰۵) انجام شد. روشهای Meyerhof (۱۹۶۳) و Hansen (۱۹۷۰) بر اساس تئوری تعادل حدی با برخی تفاوتها در فرضیات سطح گسیختگی و شرایط بارگذاری، ظرفیت باربری نهایی را پیشبینی میکنند. روش Martin (۲۰۰۵) از روش خطوط مشخصه برای محاسبه ظرفیت باربری پیهای دایرهای و نواری استفاده میکند. باید در نظر داشت که این روشها برای پیهای مدفون ارائه شدهاند و ممکن است برای پیهای باکت نیاز به اصلاح داشته باشند. خاک درون پی باکت صلب فرض شد و ظرفیت باربری پی باکت با نتایج روشهای کلاسیک برآورد شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شد که نشان میدهد مدل سازی آزمایشگاهی با دقت مناسبی انجام پذیرفت. مقادیر پیشبینی شده ظرفیت باربری با روشهای فوق در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- مقایسه بین ظرفیت باربریهای اندازهگیری شده و

		عاسبه سده	0	
(N)	باربری محاسبه شده (N)		یاریز ی اندازه گیری	شمار ہ
 Martin (۲۰۰۵)	Hansen (۱۹Y∙)	Meyerhof (۱۹۶۳)	شده (N)	ر آزمایش
٩۴	۵١	١١٩	٩۵	١
341	198	744	36.	٢
۵۵۴	341	368	۵۳۵	٣
٧۴٨	4.1	۹۵۴	٨٢٠	۴
2772	۱۷۵۹	5188	2025	۵
****	3441	3085	41.4	۶

مقایسه بین نتایج برآورد ظرفیت باربری جدول (۳) نشان میدهد که پراکندگی و اختلاف بین نتایج زیاد بوده و ظرفیت باربری اندازه گیری شده بین مقادیر پیشبینی شده با روشهای (۱۹۷۰) Hansen (۱۹۷۰) و از دارد و نزدیک به روش پیشنهادی Martin (۲۰۰۵) است. نتایج این پژوهش نشان میدهد ظرفیت باربری پیهای باکت یا لبهدار نسبت به پیهای سطحی بیشتر بوده و نزدیک به مقادیر باربری پیهای سطحی با معق مدفون شدگی برابر است. به عبارت دیگر، در اثر محصور شدن خاک توسط لبههای پی، خاک درون پی باکت در حین بارگذاری قائم تقریباً رفتاری صلب داشته و رفتار پی باکت مشابه با پی توپر^{۲۴} با عمق مدفون شدگی برابر خواهد بود. این نتیجه مطالعات گذشته را تائید می کند (نا-

از سوی دیگر، تحریکات لرزهای میتواند موجب بالا رفتن فشار آب منفذی شود و کاهش مقاومت خاک در اثر کاهش تنش مؤثر را در پی داشته باشد. برای تعیین ظرفیت باربری خاک در شرایط روانگرایی، با ایجاد تراوش رو به بالا آب، نسبت فشار آب منفذی

^{24.} Solid embedded foundation

اضافی (ru) افزایش می یابد که بیانگر شرایط روانگرایی خاک است. شکلهای (۹) و (۱۰) به ترتیب نمودارهای بار- نشست پی سطحی با قطر ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در شرایط روانگرایی خاک (ru=1) را نشان میدهند.

در دسته دوم آزمونها فشار آب منفذی افزایشیافته و *u* خاک به عدد یک میرسد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادهاند با افزایش فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پیها به دلیل کاهش تنش مؤثر میان ذرات خاک، کاهش می ابد. از نتایج مهم این تحقیق آن است که با وجود کاهش محسوس مقاومت خاک در اثر افزایش فشار آب منفذی و کاهش تنش مؤثر، ماسه هنوز هم مقاومت قابل توجهی دارد و پیها دارای ظرفیت باربری هستند. Jafarian و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند با بالا رفتن فشار آب منفذی، ظرفیت باربری پیهای سطحی مربعی و نواری نسبت به شرایط بدون اضافه فشار آب منفذی، بیش از ۵۰ درصد کاهش می یابد.



شکل ۹- نمودار بار - نشست پیهای با قطر ۱۰ سانتیمتر (ru=1)



شکل ۱۰- نمودار بار -نشست پیهای با قطر ۲۰ سانتیمتر (ru=1)

۴–۱– تغییرات ظرفیت باربری

در هر دو دسته از آزمونها بهبود عملکرد پی سطحی با اضافه شدن لبههایی در اطراف پی کاملاً مشهود است. جدول (۴) نتایج ظرفیت باربری هر یک از پیها در خاک ماسهای اشباع ارائه میکند. نتایج دسته اول آزمونها بدون فشار آب منفذی اضافی

نشان میدهند که لبهها ظرفیت باربری پیهای سطحی با ضریب بیش از ۳ برابر برای d/D=0.5 و ۵/۵ برابر برای 1=d/b افزایش میدهد و بهبود میبخشد که مستقل از عرض پی است. در تفسیر علت این پدیده میتوان به محصورشدن ماسه توسط لبههای پی اشاره کرد که در نتیجه، لبههای پی و خاک درون آن به شکل یک سیستم واحد عمل میکنند و رفتار پی مشابه با پیهای نیمهعمیق خواهد بود. همچنین نشست پی باکت در مقایسه با پی سطحی بهبود قابل توجهی مییابد و نشست کمتری در سطح تنش مشابه تجربه میکنند.

جدول ۴- ظرفیت باربری اندازه گیری شده برای پیهای با اقطار

۱۰ و ۲۰ سانتیمتر					
ظرفیت باربری (N)		d(cm) al lab	قطریہ (D(cm		
$r_u=1$	$r_u=0$		پی. (۵۰۰۰) _		
۳۵	٩۵	•	۱.		
۱۵۰	360	۵	١.		
78.	۵۳۵	۱.	١.		
۳۰۵	۸۲۰	•	۲.		
174.	2096	1.	۲.		
۱۹۵۰	41.4	۲.	۲.		

در دسته دوم آزمونها، با افزایش فشار آب منفذی، بهشدت از ظرفیت باربری پیهای سطحی کاسته میشود. در شرایطی که فشار آب منفذی (ru=1) بالا است، ظرفیت باربری پی سطحی به کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت باربری پی در شرایط خاک اشباع بدون فشار منفذی اضافی 0=r میرسد. این افت ظرفیت باربری پی ناشی از کاهش تنش مؤثر و اصطکاک میان ذرات خاک است که موجب از دست رفتن بخش زیادی از باربری پیها میشود و تشستها را افزایش میدهد. ظرفیت باربری پیهای باکت در 1= ru-1 یک کاهش تقریباً درصدی را تجربه میکند که در مقایسه با پی سطحی، عملکرد بهتری دارند. پی باکت به دلیل محصور کردن خاک اطراف و درون پی، از کاهش باربری بیشتر خاک جلوگیری میکند و رفتار پی را بهبود می خشد.

بهمنظور برآورد ظرفیت باربری پی باکت، مؤلفهای به عنوان ضریب عمق توسط محققین ارائه شد (Byrne و Houlsby، ۱۹۹۹، ۱۹۹۹ Barari و همکاران، ۲۰۱۷). براساس این مؤلفه، مقادیر باربری پی باکت تابعی از نسبت مدفون شدگی و ظرفیت باربری پی سطحی با قطر یکسان است. رابطه (۲) فرم کلی معادله را نشان میدهد.

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + n \frac{d}{D}$$
(Y)

که VBucket ظرفیت باربری قائم پی باکت، Vsurface ظرفیت باربری پی سطحی و n پارامتر تطبیقی میباشند. شکل (۱۱) نسبت باربری پی باکت به پی سطحی برحسب نسبت عمق مدفون شدگی (d/D) را نشان میدهد.

بر اساس نتایج این مطالعه می توان رابطه (۲) را برای دو حالت خاک اشباع (ru=0) و خاک اشباع همراه با تراوش رو به بالا (ru=1) ارائه نمود، رابطه (۳):



سطحی بر اساس نسبت ارتفاع لبه به قطر پی

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + 4.32 \frac{d}{D} , r_u = 0$$

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + 5.99 \frac{d}{D} , r_u = 1$$
(7)

با مقایسه میان منحنیهای شکل (۱۱) مشاهده می شود عملکرد پی باکت در خاک روانگراشده بهتر از خاک اشباع است. به عبارت دیگر در خاک روانگرا شده، باربری پی باکت به علت وجود لبه های اطراف، به طور قابل توجهی بهبود می یابد که در مقایسه با خاک اشباع 0=۲۰، بسیار بیشتر است. لبه های اطراف پی باکت با افرایش تنش محصور کننده، مقاومت خاک درون پی را افزایش می دهد، در نتیجه نشست کم تری رخ می دهد و ظرفیت باربری پی باکت نسبت به پی سطحی افزایش می یابد.

۲-۴- نشست پس از روانگرایی پی

فشار آب منفذی خاک اشباع در اثر تحریکهای لرزهای زیاد میشود و کاهش ظرفیت باربری پی و افزایش نشست پی در تنشهای متناظر را در پی خواهد داشت. برآورد نشست پیهای سطحی در شرایط میدان آزاد توسط محققین بررسی شده است و نمودارها و روابطی برای تخمین نشست پس از روانگرایی ارائه شده است (Tokimatsu و Seed، ۱۹۸۷؛ Tokimatsu و همکاران، است (۱۹۹۲). تحقیقات اخیر نشان داده است نشستهای پی پس از روانگرایی از نشست خاک در نواحی میدان آزاد بسیار بیشتر است

و بیشتر این نشستهای پی ناشی از کرنشهای برشی خاک است (Dashti و همکاران، ۲۰۱۰؛ Karamitros، ۲۰۱۳؛ Jafarian و همکاران، ۲۰۱۷).

نتایج این پژوهش نشان میدهد با افزایش نسبت فشار آب منفذی (ru) حدود ۷۰ درصد از سختی خاک کاسته می گردد و پیها نسبت به شرایط خاک اشباع بدون اضافه فشار آب منفذی، نشست نسبتاً بیشتری را تجربه می کنند. نمودارهای شکل (۱۲) نسبت اضافه نشست پیها در تنشهای برابر با تنش مجاز پی سطحی را نشان میدهند. الگو تغییرات اضافه نشست پیها در خاکهای روانگرا، برای دو پی با اقطار ۱۰ و ۲۰ سانتی متر کاملاً مشابه یکدیگر هستند.

با توجه به تغییرات نمودارها میتوان بیان نمود، پیهای سطحی با کاهش ضریب اطمینان و در فشارهای نزدیک به مقادیر باربری نهایی پی سطحی، دچار اضافه نشستهای زیادی میشوند. این در حالی است که وجود لبهها در اطراف پی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری پی، موجب بهبود عملکرد این پیهای لبهدار در خاکهای روانگرا میشود و اضافه نشست کمتری نسبت به پی سطحی دارند.



شکل ۱۲- تغییرات نشست نرمالشده برحسب ضریب اطمینان پی سطحی در شرایط تراوش رو به بالا (ru=1): الف) پی با قطر ۱۰ سانتیمتر، ب) پی با قطر ۲۰ سانتیمتر

اضافه نشست پیها میتواند عملکرد سیستمهای سازهای را مختل نماید. لذا بهمنظور طراحی پی در خاکهای روانگرا، در نظر

گرفتن رفتار خاک پس از روانگرایی و کاهش سختی و مقاومت خاک در محاسبات امری ضروری و الزامی خواهد بود.

پی باکت به علت وجود لبههایی در اطرافش دارد، سختی خاک اطراف پی را بهبود می بخشد، لذا نشست کم تری را در مقایسه با پی های سطحی تجربه خواهد نمود. نتایج این تحقیق نشان می دهد پی باکت نشست کم تری را در مقایسه با پی سطحی می کند و این کاهش نشست با افزایش ارتفاع لبه افزایش می یابد. این کاهش نشست پی باکت نشان می دهد در قیاس با پی سطحی، عملکرد بهتری در خاکهای روانگرا دارد و می تواند به عنوان گزینه مناسبی در خاکهای روانگرا تلقی شود.

۵- نتیجهگیری

پیهای باکت به عنوان جایگزین مناسبی برای پیهای توربینهای بادی فراساحلی معرفی شده است که ظرفیت باربری و عملکرد بهتری در برابر بارهای وارده دارد و یکی از مزیتهای مهم پی باکت، نصب ساده و آسان آن در قیاس با پیهای شمعی است. گسترش کاربرد این نوع پیها در مناطق لرزهخیز، بر لزوم توجه به عملکرد این قبیل پیها در خاکهای روانگرا افزوده است. تحریکات لرزهای با افزایش فشار آب منفذی، سختی خاک و ظرفیت باربری را کاهش میدهد.

تحقیقات بسیار محدودی در خصوص رفتار پی باکت در خاک روانگرا وجود دارد و در این تحقیق اثر کاهش مقاومت خاک روانگرا شده بر ظرفیت باربری پی باکت مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نشست پی باکت ناشی از روانگرایی خاک با استفاده از مدلسازی فیزیکی تحقیق شد. نتایج تحقیق نشان میدهد با افزایش فشار آب منفذی از ظرفیت باربری پی بهطور محسوسی کاسته می شود، اما حتی در روانگرایی کامل خاک، پی دارای ظرفیت باربری است و در این آزمایشها ظرفیت باربری با توجه به مقدار عمق مدفون شدگی، به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد مقدار اولیه کاهش یافت. ظرفیت باربری پی باکت به دلیل وجود لبههایی در اطراف پی، در مقایسه با پی سطحی کاهش کمتری مییابد. بر اساس نتایج این تحقیق، رابطه (۳) برای تقریب ظرفیت باربری یی باکت برحسب باربری پی سطحی و نسبت مدفون شدگی (d/D) ارائه شد. این رابطه نشان می دهد پی باکت در خاک روانگرا نسبت به پی سطحی دارای عملکرد بهتری است. بهعبارت دیگر، به علت مکانیسمهای گسیختگی داخلی یی باکت و محصور شدن خاک درون و اطراف پی، پی باکت نسبت به پی سطحی دارای ظرفیت باربری بیشتر و عملکرد بهتری در خاکهای روانگرا خواهد بود.

همچنین پی باکت در مقایسه با پی سطحی تحت اثر فشار یکسان نشست کمتری می کند که این پدیده در خاکهای روانگرا شده بیشتر مشهود است. نمودارهای (شکل (۱۲)) برای برآورد

نشست اضافی پی سطحی و پی باکت با اضافه فشار منفذی ارائه شدهاند. براساس این نمودارها، پیهای باکت به دلیل دارا بودن لبههای جانبی، اضافه نشست ناشی از روانگرایی را تقلیل میدهد. لذا میتوان از پی باکت بهعنوان جایگزین مناسبی برای پیهای سطحی نام برد که علاوه بر تحمل بار بیشتر، در مقایسه با پیهای سطحی، نشست اضافی کمتری در خاکهای روانگرا دارند.

6- مراجع

ذکری ۱، امینفر مح، قلندرزاده ع، لطفالهی یقین مع، "رفتار لرزهای دیوارهای ساحلی سپری مدفون در لایه مستعد روانگرایی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۴، ۴۵ (۱)، ۱۵–۲۸.

صاحب کرم علمداری آ، نجفی ا، "بررسی احتمال وقوع روانگرایی و تخمین اهمیت نسبی پارامترهای مؤثر با استفاده از خوشهبندی فازی و برنامهریزی ژنتیک"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶، ۴۷ (۴) ۳۷-۴۶.

- Adachi T, Iwai S, Yasui M, Sato Y, "Settlement and inclination of reinforced concrete buildings in dagupan city due to liquefaction during the 1990 Philippine Earthquake", In: Earthquake Engineering,Tenth World Conference, 1992, 147-152.
- Barari A, Ibsen LB, "Vertical capacity of bucket foundations in undrained soil", Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 20 (3), 360-371.
- Barari A, Ibsen LB, Taghavi Ghalesari A, Larsen KA, "Embedment effects on vertical bearing capacity of offshore bucket foundations on cohesionless soil", International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (4), 04016110.
- Byrne BW, Houlsby GT, "Drained behaviour of suction caisson foundations on very dense sand", In: Proc., Offshore Technology Conf., Offshore Technology Conference, Houston, 1999.
- Byrne BW, Houlsby GT, "Experimental investigations of the response of suction caissons to transient vertical loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (3), 240-253.
- Calvetti F, Prisco C, Nova R, "Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130, 1292-1299.
- Dash SR, Bhattacharya S, Blakeborough A, "Bendingbuckling interaction as a failure mechanism of piles in liquefiable soils", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30 (1-2), 32-39.
- Dashti S, Bray JD, Pestana JM, Riemer M, Wilson D, "Mechanisms of Seismically Induced Settlement of Buildings with Shallow Foundations on Liquefiable Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010a, 136 (1), 151-164.

Prentice Hall, New Jersey. 1996.

- Lagioia R, Sanzeni A, Colleselli F, "Air, water and vacuum pluviation of sand specimens for the triaxial apparatus", Soils and Foundations (Online), 2006, 46 (1), 61-67.
- Liu L, Dobry R, "Seismic response of shallow foundation on liquefiable sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123 (6), 557-567.
- Loukidis D, Salgado R, "Effect of relative density and stress level on the bearing capacity of footings on sand", Géotechnique, 2011, 61 (2), 107-119.
- Martin CM, "Exact bearing capacity calculations using the method of characteristics", In: 11th of the Proceedings of the International Conference on Analytical and Computational Methods in Geomechanics, Turin., 441-450, 2005.
- Meyerhof GG, "Some recent research on the bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal, 1 (1), 1963, 16-26.
- Rasouli R, Towhata I, Hayashida T, "Mitigation of seismic settlement of light surface structures by installation of sheet-pile walls around the foundation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 72, 108-118.
- Su L, Tang L, Ling X, Liu C, Zhang X, "Pile response to liquefaction-induced lateral spreading: A shaketable investigation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82, 196-204.
- Tatsuoka F, Goto S, Tanaka T, Tani K, Kimura Y, "Particle size effects on bearing capacity of footing on granular material", In: Deformation and Progressive Failure in Geomechanics. Pergamon Press: Oxford, 133-138, 1997.
- Tokimatsu K, Kojima J, Kuwayama AA, Midorikawa S, "Liquefaction-induced damage to buildings I 1990 Luzon Earthquake", Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 1994, 120 (2), 290-307.
- Tokimatsu K, Seed HB, "Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking", Journal of geotechnical engineering, 1987, 113 (8), 861-878.
- Towhata I, "Geotechnical Earthquake Engineering", Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- Vargas-Monge W, "Ring shear tests on large deformation of sand", Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 1998.
- Vesic´ A, "Bearing capacity of shallow foundations", In: Winterkorn, HF, Fang HY, (Eds.), Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147, 1975.
- Vesic A, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1973, 99, 45-73.
- Villalobos FA, "Model testing of foundations for offshore wind turbines", Ph.D. thesis, Oxford University, 2006.
- Whitman RV, Lambe PC, "Liquefaction: consequences for a structure", In: Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference, Southampton, England, 941-949, 1982.
- Wood FM, Yamamuro JA, Lade PV, "Effect of depositional method on the undrained response of silty sand", Canadian Geotechnical Journal [online],

- Dashti S, Bray JD, Pestana JM, Riemer M, Wilson D, "Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010b, 136 (7), 918-929.
- Eid HT, "Bearing Capacity and Settlement of Skirted Shallow Foundations on Sand", International Journal of Geomechanics, 2013, 13 (5), 645-652.
- Foglia A, Gottardi G, Govoni, L, Ibsen LB, "Modelling the drained response of bucket foundations for offshore wind turbines under general monotonic and cyclic loading", Applied Ocean Research (online), 2015, 52, 80-91.
- Gourvenec S, Acosta-Martinez H, Randolph M, "Centrifuge model testing of skirted foundations for offshore oil and gas facilities", In: Proceedings of the international conference on offshore site investigation and geotechnics. London, UK, 2007.
- Hansen JB, "A revised and extended formula for bearing capacity", Bulletin of the Danish Geotechnical Institute, 1970, 28, 5-11.
- Houlsby G, Byrne B, "Suction caisson foundations for offshore wind turbines", Wind Engineering, 2000, 24 (4), 249-255.
- Houlsby GT, Ibsen LB, Byrne BW, "Suction caissons for wind turbines", In: International symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, 2005, 75-94.
- Iai S, "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", Soils and Foundations, 1989, 29 (1), 105-118.
- Ibsen LB, Larsen KA, Barari A, "Calibration of failure criteria for bucket foundations on drained sand under general loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140 (7), 1-16.
- Ishihara K, Yoshimine M, "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes", Soils and foundations, 1992, 32 (1), 173-188.
- Jafarian Y, Haddad A, Mehrzad B, "Load-Settlement Mechanism of Shallow Foundations Rested on Saturated Sand with Upward Seepage", International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (3), 04016076.
- Jafarian Y, Mehrzad B, Lee C, Haddad A, "Centrifuge modeling of seismic foundation-soil-foundation interaction on liquefiable sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 97, 184-204.
- Karamitros DK, Bouckovalas GD, Chaloulos YK, "Insight into the Seismic Liquefaction Performance of Shallow Foundations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 139 (4), 599-607.
- Karamitros DK, Bouckovalas GD, Chaloulos YK, "Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust", Soil Dynamics and Earthquake Engineering (online), 2013, 46 (C), 64-76.
- Kelly RB, Byrne BW, Houlsby GT, Martin C M, "Pressure chamber testing of model caisson foundations in sand", In: BGA Int. Ionf. on Foundations, Dundee, UK. 2003.
- Kramer ST, "Geotechnical earthquake engineering",

2008, 45 (11), 1525-1537.

- Yoshimi Y, Tokimatsu K, "Settlement of buildings on saturated sand during earthquakes", Soils and FoundationsJournal, 1977, 17 (1), 23-38.
- Yu H, Zeng X, Lian J, "Seismic behavior of offshore wind turbine with suction caisson foundation", In: Geo-Congress 2014, 1206-1214.
- Yu H, Zeng X, Neff FH, Li B, Lian J, "Centrifuge modeling of offshore wind foundations under earthquake loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering (online), 2015, 77, 402-415.
- Zhang P, Xiong K, Ding H, Le C, "Anti-liquefaction characteristics of composite bucket foundations for offshore wind turbines", Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6 (5).
- Zheng J, Suzuki K, Ohbo N, Prevost JH, "Evaluation of sheet pile-ring countermeasure against liquefaction for oil tank site", Soil Dynamics and Earthquake Engineering (online), 1996, 15 (6), 369-379.
- Zhu B, Byrne B, Houlsby G, "Long-Term Lateral Cyclic Response of Suction Caisson Foundations in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (online), 2013, 139 (1), 73-83.
- Zhu F, Clark JI, Phillips R, "Scale Effect of Strip and Circular Footings Resting on Dense Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (online), 2001, 127 (7), 613-621.



EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation on the Behavior of Bucket Foundations Rested on Liquefiable Soils

Abdolhosein Haddad^{*}, Reza Amini

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 13 February 2018; Accepted: 25 April 2019

Keywords:

Bucket foundation, Liquefaction-induced settlement, Bearing capacity, Physical modeling, Upward seepage

1. Introduction

Wind turbines are installed in windy coastal and offshore regions to extract the wind energy with high efficiency (Barari et al. 2017). The construction cost of the foundation of offshore wind turbines is about 30% of the cost of all superstructure and foundations. Therefore, the economic design of the foundation is critically important and many researchers have focused on it. Offshore wind turbines are usually constructed on gravity-based or monopiles. Bucket foundations or skirted foundations are widely used in offshore regions, oil and gas industries. The use of bucket foundations has been increased in offshore regions especially for foundations of wind turbines over the past two decades (Byrne and Houlsby 2004; Eid, 2013). The behavior of tripod and pile foundations in liquefied soils was investigated. But there are limited reports and studies on the behavior of bucket foundations to study the behavior of bucket foundations in liquefied soils. It was found that increasing the foundation diameter and length of the skirt had the highest impact on the reduction of pore pressure. Moreover, an increase in the skirt length had the highest impact on the reduction of settlement.

The upward seepage can create the soil conditions during the earthquake and liquefaction. In this study, several 1g physical modeling were carried out on shallow and bucket foundations at various levels of excess pore-water pressure. The experiments were designed to evaluate the bearing capacity changes and settlement of shallow and bucket foundations in liquefiable soil. The excess pore-water pressure within the underlying soil was produced through the upward seepage. It can be considered as representative of the pore pressure during the earthquake or static upward seepage.

2. Methodology

2.1. Experimental study

A collection of laboratory apparatus including the testing container, the loading system and the data collection unit in Soil Laboratory of Semnan University were used for physical modeling the behavior of bucket foundation in liquefied graded soils. The schematic view of the experimental setup is shown in Fig. 2. The testing container was employed as a rigid box with dimensions of 120 cm (length), 90cm (height), and 90cm (width). Furthermore, a transparent plexiglass sheet was installed in one side of the testing container to see the soil behavior during the loading.



Fig. 1. Schematic view of the experimental setup and upward seepage

Another system was also installed beneath the container to produce the excess pore pressure in the soil mass. This system consisted of the input and output water flow pipes in the testing container, and the water pressure increased by pumping water into the container, and subsequently the pore pressure and upward seepage increased the excess pore pressure ratio (r_u). The test was performed in different levels of the excess pore pressure (r_u) in order to evaluate the impact of pore pressure on the excess settlement of foundation and bearing capacity changes of foundation. Due to the upward water pressure beneath the soil mass, the soil might be scoured and the pressure distribution might not be uniform; hence, a layer of gravel with a thickness of at least 5cm was placed at the bottom of the container and its surface was covered by a reticular rubber with pores for water penetration in order to avoid the scouring phenomenon. The gravel layer and the reticular net above could cross the water, avoid the soil scouring and unify the pore pressure distribution.

The use of upward seepage for representation of earthquake-induced excess pore pressure was employed by previous researchers. For instance, Calvetti et al., (2004) carried out a number of investigations into the post-liquefaction performance of buried pipes in the soil and the pore pressure produced by the controlled upward seepage. In this study, the bearing capacity of shallow and bucket foundations is evaluated in two soil conditions including the saturated soil and complete liquefaction with excess pore-water pressure ratios of 0 and 1. The excess pore water pressure ratio is defined by Equation (1).

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma_{v,0}} \tag{1}$$

Where, r_u is the excess pore pressure ratio; Δu is the excess pore pressure, and σ'_{v0} is the initial vertical effective stress of soil in the free field.

3. Results and discussion

A relationship was provided as the depth factor by researchers (Barari et al., 2017; Byrne and Houlsby, 1999) in order to estimate the bearing capacity of the bucket foundation. Based on this relationship, the bearing capacity of the foundation is a function of the embedment ratio (d/D) and the capacity of the surface foundation with the same diameter. Equation (2) shows the general form of the formula.

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + n \frac{d}{D}$$
⁽²⁾

Where, V_{Bucket} is the vertical bearing capacity of the bucket foundation; $V_{Surface}$ is the bearing capacity of the surface foundation, and n is the fitting parameter. Fig 2. Shows the bearing ratio of the bucket to surface foundations in terms of the embedment ratio (d/D). Based on the results of this study, the Equation (2) can be provided for both saturated soil (r_u =0) and the saturated soil with the upward seepage (r_u =1) as Equation (3):

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + 4.32 \frac{d}{D} , r_u = 0$$

$$\frac{V_{Bucket}}{V_{Surface}} = 1 + 5.99 \frac{d}{D} , r_u = 1$$
(3)



Fig. 2. Bearing capacity factor as a function of embedment ratio

Comparing the curves of Fig. 2. it can be seen that Due to the skirts around the bucket foundation increase the soil strength within the foundation by increasing the confinement pressure, and thus less settlement occurs and the bearing capacity of the bucket foundation will be higher than the shallow foundations.

4. Conclusions

Bucket foundations are the suitable alternatives for foundations of the offshore wind turbines with better performance and bearing capacity against external loads. One of the important advantages of the bucket foundation is its simple installation compared to the pile foundations. The widespread application of such foundations in seismic regions has increased the importance of attention to the performance of such foundations in the liquefied soils. Seismic excitement decreases the soil stiffness and bearing capacity by providing the pore-water pressure .

The present study evaluated the behavior of shallow and bucket foundations in liquefied soils. Results of the present study indicated that the buildup pore-water pressure significantly reduced the bearing capacity of foundations; however, the foundations had the bearing capacity even in the complete soil liquefaction. The bearing capacity of the bucket foundation had a reduction of less than the shallow foundation due to the existence of skirts around the foundation. Equation (3) was presented based on the results of the present study to estimate the bearing capacity of bucket foundations in terms of the shallow foundation bearing and the embedment ratio (d/D). This equation indicated that the bucket foundation had a better performance in liquefied soils compared to the shallow foundations. In other words, the bucket foundation had a higher bearing capacity and better performance in liquefied soils than the shallow foundation due to its internal failure mechanisms and soil confinement around and inside the foundation.

5. References

- Barari A, Ibsen LB, Taghavi Ghalesari A, Larsen KA, "Embedment effects on vertical bearing capacity of offshore bucket foundations on cohesionless soil", International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (4), 04016110.
- Byrne BW, Houlsby GT, "Drained behaviour of suction caisson foundations on very dense sand", In: Proc., Offshore Technology Conf., Offshore Technology Conference, Houston, 1999.
- Byrne BW, Houlsby GT, "Experimental investigations of the response of suction caissons to transient vertical loading", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (3), 240-253.
- Calvetti F, Prisco C, Nova R, "Experimental and numerical analysis of soil-pipe interaction", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130, 1292-1299.
- Eid HT, "Bearing Capacity and Settlement of Skirted Shallow Foundations on Sand", International Journal of Geomechanics, 2013, 13 (5), 645-652.
- Yu H, Zeng X, Neff FH, Li B, Lian J, "Centrifuge modeling of offshore wind foundations under earthquake loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering (online), 2015, 77, 402-415.