

تأثیر مکش بافتی بر رفتار شمع در خاک غیر اشباع با کمک مدل سازی فیزیکی در FCV

محمد مرتضایی^{۱*}، سید ابوالحسن نائینی^۲، ابوالفضل اسلامی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - خاک و پی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استاد گروه مهندسی عمران- خاک و پی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- استاد گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

mortezaee_m06@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵

چکیده

یکی از راهکارهای مناسب برای بررسی رفتار شمع، مدل سازی فیزیکی آن در آزمایشگاه است. برای مدل سازی فیزیکی می توان از محفظه ساده، محفظه کالیبراسیون و دستگاه سانتیفریوژ استفاده نمود. محدودیت ها و سختی های موجود در این وسایل باعث شد به تازگی وسیله ای به نام دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV) برای مدل سازی فیزیکی پی های عمیق به جهان معرفی شود. در این دستگاه که به شکل مخروط ناقص است، می توان با اعمال فشار در کف دستگاه یک گرادین خطی تنش در امتداد محوری مرکزی ایجاد نمود تا با آنچه در واقعیت اتفاق می افتد هم خوانی داشته باشد. با وجود مزایای زیادی که این دستگاه دارد ولی در آن سیستمی برای سنجش مکش بافتی خاک های غیر اشباع در نظر گرفته نشده است. پس در این پژوهش با ابزارگذاری نمونه ساخته شده از این دستگاه در دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT) و اجرای شمع درون آن، این امکان فراهم می شود تا رفتار شمع در خاک غیر اشباع و تأثیر مکش بافتی بر نمودار نیرو- تغییر مکان بررسی شود. شمع استفاده شده در این پژوهش یک شمع انتها باز است که با روش کوبشی و در ماسه لای دار فیروزکوه با رطوبت های وزنی ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد اجرا و در هر مورد نمودار نیرو- تغییر مکان ترسیم شده است. نتایج نشان می دهد در این خاک با افزایش درصد رطوبت از حالت خشک (مکش صفر) به رطوبت ۵ درصد (افزایش مکش) با یک افزایش در نقطه اوج نمودار (ظرفیت باربری نهایی) مواجه می شویم سپس از رطوبت ۵ تا ۱۵ درصد با آنکه مکش کاهش می یابد باز هم ظرفیت باربری افزایش می یابد ولی در انتها با افزایش رطوبت از ۱۵ به ۲۰ درصد روند کاهشی می شود. این روند تغییرات نشان دهنده یک رطوبت بحرانی در این خاک است که در آن رطوبت ظرفیت باربری شمع حداکثر می شود. مقدار این رطوبت بسته به دانه بندی و تراکم خاک می تواند متفاوت باشد.

واژگان کلیدی: شمع، خاک غیر اشباع، مکش، ظرفیت باربری نهایی، دستگاه فشار همه جانبه مخروطی

۱- مقدمه

پی‌های عمیق بیشتر در پروژه‌های متداول مهندسی برای انتقال بار از رو سازه سنگین (پل‌ها، بزرگراه‌ها، خاکریزها و ساختمان‌های بلند مرتبه) به خاک زیرین به صورت امن و بدون مشکلات نشست و یا عدم پایداری استفاده می‌شود. در بسیاری از این پروژه‌ها تمام طول شمع یا بخشی از آن در بالای سطح آب زیر زمینی قرار می‌گیرد (منطقه غیراشباع^۱) که در طراحی‌های متداول امروزه از غیراشباع بودن خاک و سهم مکش بافتی^۲ در ظرفیت باربری شمع صرف‌نظر و طراحی با این فرض که خاک کاملاً اشباع و یا کاملاً خشک است صورت می‌گیرد [1]. این کار ممکن است هم دقت طراحی و هم مسائل اقتصادی پروژه را تحت الشعاع قرار دهد. در واقع هر چند چنین فرضی برای ساده کردن مساله بکار می‌رود و محافظه کارانه است، ولی برای تخمین صحیح نمودار نیرو - تغییر مکان و ظرفیت باربری شمع، مناسب نبوده و برای رسیدن به طراحی‌های دقیق و اقتصادی تر نیاز به بررسی واقع بینانه ای از رفتار ژئوتکنیکی شمع‌ها در خاک غیراشباع می‌باشد.

با بررسی مطالعات انجام شده در سالهای گذشته، می‌توان به نقش پر رنگ مکش بافتی در ظرفیت باربری خاک‌های غیر اشباع پی برد [2]. در سال‌های اخیر نیز مطالعات آزمایشگاهی و عددی مختلفی در مورد اثر مکش بافتی و تنش موینگی^۳ در طراحی پی‌های سطحی و عمیق انجام گرفته [3-7] ولی در این تحقیقات تمرکز اصلی تنها روی تشریح ظرفیت باربری پی‌های سطحی در خاک‌های درشت دانه و ریزدانه غیر اشباع و همچنین محاسبه ظرفیت باربری اصطکاکی تک شمع‌ها در خاک‌های ریزدانه غیر اشباع بوده و کمتر به بررسی ظرفیت باربری شمع‌ها در خاک دانه‌های غیر اشباع و چگونگی تغییرات آن در مقابل مکش بافتی، پرداخته شده است. به همین دلیل، ضرورت بررسی رفتار شمع در خاک دانه‌ای غیر اشباع دیده میشود تا بتوان با بهره‌گیری از نتایج تحقیق، در پروژه‌هایی که در آنها استفاده از

شمع ضرورت دارد، به طراحی‌های کم هزینه‌تر و واقع بینانه‌تر برسیم.

به طور کلی برای بررسی رفتار پی‌های عمیق می‌توان از روش‌های تحلیلی [8]، عددی [9] و آزمایش‌ها یا مشاهدات تجربی [10-12] کمک گرفت. از آنجا که در روش‌های عددی و تحلیلی معمولاً یک سری ساده‌سازی صورت می‌گیرد، برای حصول نتیجه مطلوب‌تر، استفاده از روش‌های تجربی انتخاب می‌شود. روش‌های تجربی به دو صورت بررسی مدل‌های واقعی در محل و یا انجام آزمایش روی مدل کوچک مقیاس در آزمایشگاه (مدل‌سازی فیزیکی) قابل انجام است که به دلیل هزینه پایین‌تر، سادگی اجرا و تکرار پذیری، معمولاً مدل‌سازی فیزیکی نسبت به مدل‌های واقعی در محل (صحرائی) ترجیح داده می‌شود. مدل‌سازی فیزیکی به دو نوع، مدل‌سازی در سطوح تنش پایین و سطوح تنش بالا (نمونه اصلی) تقسیم می‌شود، که در سطوح تنش پایین مدل‌سازی با شتاب گرانش 1g انجام می‌گیرد (مانند مدل‌سازی با میز لرزه و محفظه ساده^۴) و در سطوح تنش بالا با شتاب ng (مانند سانتریفیوژ و دستگاه محفظه کالیبره^۵) انجام می‌شود. هر یک از این دستگاه‌ها مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند. مثلاً دستگاه محفظه ساده با وجود آنکه به مقدار خاک کمی برای انجام مدل‌سازی نیاز دارد ولی در مقایسه با شرایط واقعی پروژه سطح پایینی از تنش را می‌تواند مدل نماید و برای مدل‌سازی خاک در اعماق زیاد با مشکل مواجه می‌شود. در مورد محفظه کالیبراسیون نیز با وجود آنکه می‌توان تنش متناظر با هر عمقی از خاک را درونش شبیه‌سازی نمود ولی این دستگاه قادر به نشان دادن تغییرات تنش در عمق نیست. دستگاه سانتریفیوژ می‌تواند شرایط تنش موجود در صحرا یعنی سطح تنش و تغییرات آن در عمق را تا حد قابل قبولی مدل‌سازی نماید، لیکن مدل‌سازی با این دستگاه نیز با موانعی مانند دسترسی محدود به دستگاه، هزینه نسبتاً بالای آزمایش و مشکلات مربوط به مدل‌سازی در حالت چرخش دستگاه همراه است [13]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها دستگاه فشار همه جانبه مخروطی

4.Simple Chamber
5.Calibration Chamber

1. Vadose zone
2. Matric Suction
3. Capillary Stress

در سال ۱۳۹۱ (۲۰۱۲) نمونه‌ای موفق از این دستگاه با نام FCV-AUT در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ایران ساخته شد. این دستگاه به علت داشتن ابعاد بزرگتر نسبت به دو نمونه ساخته شده مشابه در جهان، قابلیت اجرای شمع با ابعاد بزرگتری را داشته و از این رو خطاهای مربوط به آثار مقیاس و مرزها را کاهش می‌دهد. اشکال عمده این دستگاه و دو نمونه دیگر مشابه موجود در جهان، عدم تعریف سازوکاری برای اندازه‌گیری فشار آب و هوای حفره‌ای و به دنبال آن مکش بافتی که پارامتری تأثیر گذار در محاسبات مربوط به ظرفیت باربری است، می‌باشد. از این رو در این مقاله ابتدا توضیح مختصری از مشخصات این دستگاه و روند ارتقاء آن به منظور اندازه‌گیری مکش بافتی خاک بیان می‌شود، سپس منحنی مشخصه خاک مورد آزمایش را بدست آورده و در نهایت با اجرای شمع انتها باز در دستگاه و ترسیم منحنی‌های نیرو- تغییر مکان در رطوبت های وزنی مختلف (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد)، به بررسی چگونگی تغییر رفتار نمودارها با توجه به تغییرات مکش بافتی پرداخته می‌شود.

۲- معرفی FCV-AUT

برای مدل‌سازی شمع از دستگاه FCV-AUT که در دانشگاه امیرکبیر ساخته شده است استفاده می‌شود. البته برای اندازه‌گیری مکش بافتی باید روی دستگاه تغییراتی اعمال شود، که در بخش ۵ تشریح می‌شود. دستگاه مورد استفاده دارای ارتفاع ۱۳۰ سانتی‌متر و قطر ۳۰ و ۱۳۵ سانتی‌متر به ترتیب در بخش بالایی و پایینی است. اندازه بزرگ دستگاه نسبت به دو نمونه جهانی موجود، باعث می‌شود که شرایط به تنش‌های ایجاد شده در صحرا^۲ نزدیک‌تر بوده و در نتایج خطای کمتری ایجاد شود. بدنه اصلی دستگاه به صورت دو تکه ساخته شده تا بتوان به سهولت امر نمونه‌سازی را انجام داد. در بخش پایینی دستگاه یک صفحه فولادی تعبیه شده تا یک غشای لاستیکی بین آن و کف دستگاه قرار گیرد و بتوان فشار کف را از طریق آن اعمال نمود [13]. برای اعمال فشار کف از یک مخزن هوا-آب کمک گرفته می‌شود. روند انجام کار بدین گونه است که ابتدا ۲/۳ مخزن را

(FCV) در سال ۱۹۹۶ ساخته شد و بعد از آن توسط پژوهشگران دیگر توسعه پیدا کرد [14-16]. FCV یک دستگاه جدید برای مدل‌سازی فیزیکی در شرایط تنش واقعی، مشابه موقعیت‌های صحرایی (سطوح تنش بالا) است و تاکنون توسط تعداد کمی از پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. این دستگاه یک نوع خاص و ابتکاری از محفظه‌های کالیبره برای مدل‌سازی میدان تنش واقعی است. FCV، یک مخزن با شکل مخروط ناقص است که خاک در درون آن قرار گرفته و فشار محصور کننده از انتهای مخزن به خاک اعمال می‌شود. با توجه به شکل فیزیکی این دستگاه، تنش قائم در سطح بالایی خاک درون مخزن صفر بوده و با افزایش عمق به مقدار آن افزوده می‌شود. تنش‌های جانبی توده خاک نیز تابعی از تنش قائم و خواص مکانیکی خاک است که با افزایش عمق به میزان آنها نیز افزوده می‌شود. این دستگاه هم مزایای محفظه‌های کالیبره را در راحتی مدل‌سازی و مقیاس مناسب مدل دارد و هم مانند دستگاه سانتیفریوژ قادر به بازسازی گرادین تنش در عمق خاک است. یکی دیگر از ویژگی‌های ارزشمند FCV آن است که با تغییر میزان فشار اعمالی به کف سیستم می‌توان شیب تنش ایجاد شده در خاک را کاهش یا افزایش داد. در شکل (۱) نمای شماتیک این دستگاه و توزیع تنش ایجاد شده در حجم کنترلی آن به صورت ایده‌آل ترسیم شده است [16].

شکل ۱. شکل شماتیک دستگاه FCV (راست) و توزیع ایده‌آل تنش در راستای افقی و قائم (چپ) [15]

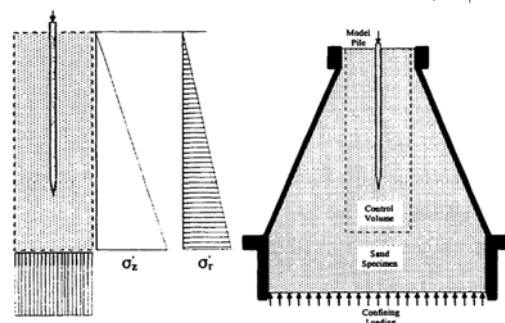


Fig. 1. Schematic of an FCV (right) and idealized distribution of vertical and lateral stresses (left) [15]

یک شمع استیل انتها باز با طول ۱ متر است که به روش کوبشی در خاک اجرا شده است. منحنی دانه‌بندی و تصویر شمع مورد استفاده به ترتیب در شکل (۴ و ۵) و ویژگی‌های خاک و شمع مورد آزمایش به ترتیب در جداول (۱ و ۲) آمده است.

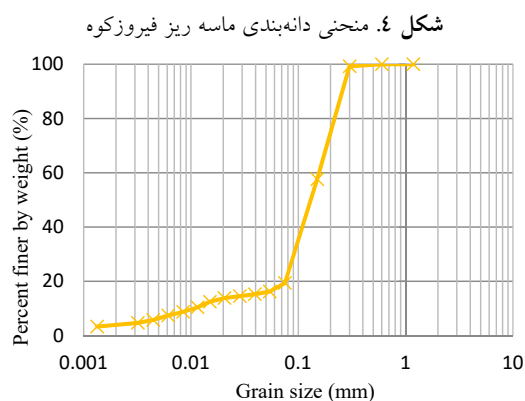


Fig. 4. Grain size distribution of firuzkuh fine sand

شکل ۵. شمع مورد استفاده در آزمایش



Fig. 5. pile used in tests

جدول ۱. ویژگی‌های پایه‌ای خاک مورد آزمایش

Item	Quantity
Effective particle size (D_{10}) (mm)	0.01
Average particle size (D_{50}) (mm)	0.17
Uniformity coefficient, C_u	18.5
Coefficient of curvature, C_c	5.4
Maximum dry unit weight, $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	16.34
Minimum dry unit weight, $\gamma_{d,min}$ (kN/m ³)	13.25
Maximum void ratio, e_{max}	1.1
Minimum void ratio, e_{min}	0.63
Specific gravity, G_s	2.65
Classification	SM

Table 1. Basic properties of tested soil

از آب پر نموده و سپس درون آن به وسیله کمپرسور، هوای فشرده وارد می‌نماییم. در نهایت نیز با باز کردن شیر تعبیه شده، آب با فشار مد نظر به فضای بین غشای لاستیکی و صفحه فلزی زیر دستگاه هدایت می‌شود. با تنظیم رگولاتور قرار داده شده، می‌توان فشار کف مد نظر را به سیستم اعمال نمود (شکل ۲ و ۳).

شکل ۲. دستگاه FCV-AUT (راست) و توزیع تنش در آن (چپ) [17]

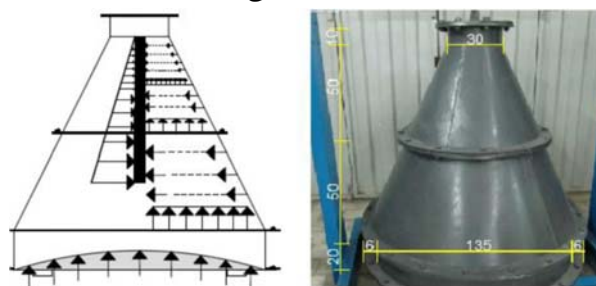


Fig. 2. FCV-AUT (right) and Stress distribution in it (left)[17]

شکل ۳. سیستم اعمال فشار کف به صورت شماتیک [18]

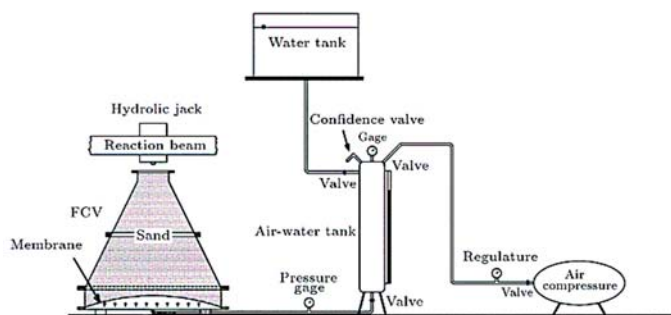


Fig. 3. Schematic details of bottom pressure system[18]

این دستگاه با موفقیت توانسته رفتار پی‌های عمیق را در انواع خاک‌ها و شمع‌ها و با روش‌های مختلف اجرا، مدل‌سازی نماید [17-19].

۳- مشخصات مصالح

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه ریزدانه فیروزکوه است (ماسه ۱۰۰) که آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین دانه‌بندی، وزن مخصوص ویژه و بیشینه و کمینه وزن مخصوص خشک طبق استانداردهای ASTM روی آن انجام شده است [20-23]. این خاک بر طبق سیستم طبقه‌بندی متحد خاک (USCS) به عنوان ماسه لای‌دار نام‌گذاری شده است. شمع مورد استفاده نیز

۵- ابزار گذاری FCV-AUT

همان گونه که بیان شد، دستگاه FCV-AUT برای مدلسازی فیزیکی شمع در خاک خشک و مرطوب به خوبی توانسته رفتار شمع را شبیه سازی نماید ولی تاکنون به علت عدم قابلیت اندازه گیری فشار آب و هوای حفره ای، تاثیر تغییرات رطوبت و به دنبال آن تغییرات مکش بافتی، رفتار شمع در این دستگاه مدل سازی نشده است. از این رو برای کامل شدن دستگاه باید به نحوی این قابلیت به آن افزوده شود که در ادامه این بخش شرح مختصری از روند انجام این کار بیان می شود.

برای اندازه گیری مکش بافتی در این دستگاه از سه تانسیومتر، که در سه تراز ارتفاعی مختلف قرار می گیرند، استفاده می شود. تانسیومتر مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت Zeal کشور چین است که قابلیت اندازه گیری مکش خاک تا حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال را دارد. به این تانسیومتر یک مبدل فشار دیجیتال (DPT) با دقت ۰/۳ کیلو پاسکال متصل می شود تا با دقت خوبی بتوان مکش را در نقاط مختلف FCV قرائت نمود (شکل ۷).



Fig 7. Tensiometer parts

DPT

برای قرار دادن تانسیومترها درون دستگاه، ابتدا سه شیار (سوراخ استوانه ای شکل) در فاصله ۲۰ سانتی متری از بالای FCV و با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم روی بدنه ایجاد می شود. شکل (۸) که این فاصله به دو دلیل انتخاب شد: اولاً نزدیکترین نقطه ای است که با توجه به وجود لبه در بالای دستگاه (گیر نکردن تانسیومتر به لبه ها) امکان اجرای کار را میسر می سازد. ثانیاً در نقاط پایین تر، به دلیل فاصله زیاد تانسیومتر از شمع، امکان مشاهده اثرات نفوذ شمع روی تغییرات مکش میسر نبود.

جدول ۲. ویژگی های شمع مدل

Installation method	Pile type	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Pile embedment (cm)
Driving	Open-ended steel pile	30	20	75

Table 2. Model pile characteristics

۴- منحنی مشخصه آب - خاک

برای بدست آوردن منحنی مشخصه خاک مورد آزمایش، از دو روش مختلف برای مقادیر مکش کوچک و بزرگ استفاده شده است. در روش اول با استفاده از یک نمونه کوچک از همان خاک و با قرار دادن تانسیومتر^۲ (مکش های زیر ۱۰۰ کیلو پاسکال) داخل نمونه و در روش دوم با تکنیک فیلتر کاغذی^۳ (مکش های بالای ۲۰ کیلو پاسکال) و مطابق استاندارد ASTM D5298-16 [24] مقادیر مکش به ازاء چند درصد رطوبت بدست می آید. علت استفاده از این روش ها به انتظار ما از منحنی مشخصه در این تحقیق بر می گردد. آزمایش ها بدین گونه است که در آنها خاک در یک درصد تراکم نسبی ثابت و از رطوبت صفر (خشک) به سمت رطوبت های بالاتر می رود. بنابراین روش مورد استفاده باید به شکلی باشد که اولاً منحنی ترشدگی حاصل شود و ثانیاً درصد تراکم نسبی در طول آن ثابت باشد. در شکل (۶) نقاط خروجی و بهترین نمودار هماهنگ بر آنها بر اساس معادله Fredlund and Xing [25] آمده است (مسیر ترشدگی).

شکل ۶. منحنی مشخصه آب - خاک ماسه ریز فیروزکوه

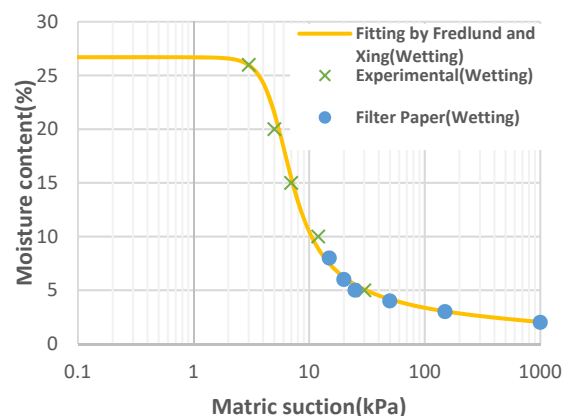


Fig. 6. Soil-water characteristic curve of firuzkuh fine sand

به درصد رطوبت خاک، از حدود ۱/۵ روز برای رطوبت ۵ درصد تا ۳ ساعت برای رطوبت ۲۰ درصد متغیر است. در اشکال (۱۱ و ۱۲) نمودارهای مکش بافتی-زمان، مربوط به رطوبت ۵ درصد به عنوان نمونه آمده است. در شکل (۱۲) ساعت ۳۲ام نقطه شروع اعمال فشار کف است. همان گونه که مشاهده می شود به جز ایجاد یک پرش جزئی تغییر چندانی در مقادیر قرائت شده مشاهده نمی شود. علت به وجود آمدن پرش ابتدای آزمایش در شکل (۱۲)، خطای آزمایش است. این خطا ناشی از حباب های ریز به وجود آمده در داخل لوله تانسومتر بوده که بعد از گذشتن مدتی و رفع حباب ها، منحنی به روند قبلی باز می گردد.

شکل ۹. جانمایی تانسومترها برای بررسی همگنی مکش

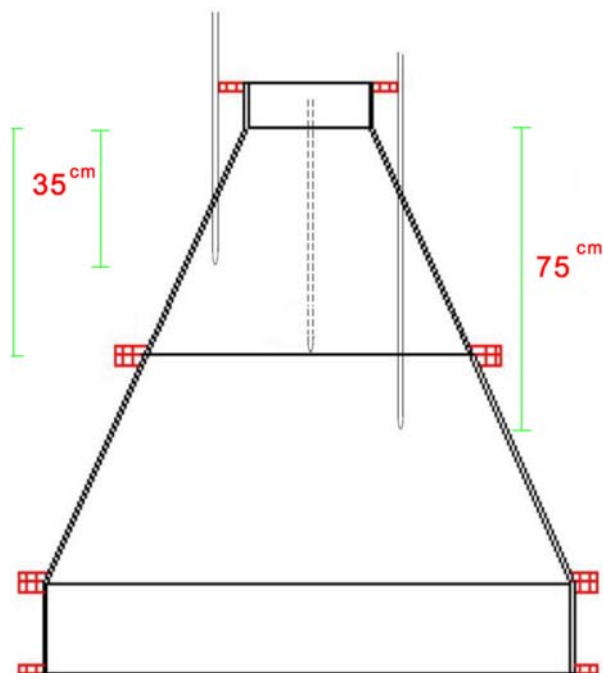


Fig. 9. Location of tensiometers to check matrix suction homogeneity

شکل ۸. تصویر و شکل شماتیک محل تانسومترها

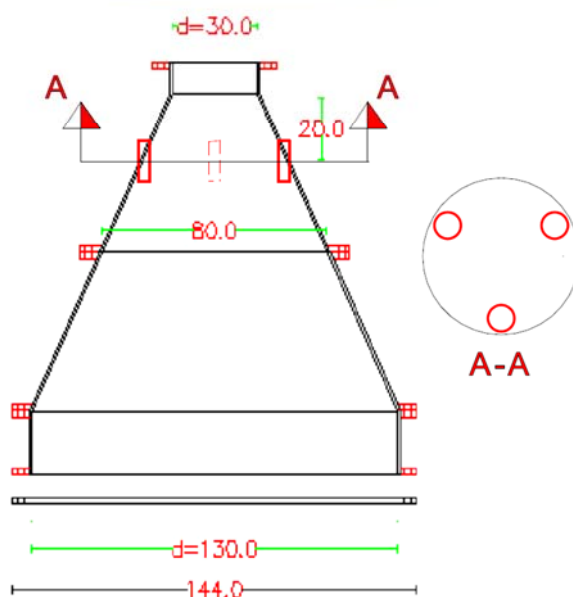


Fig. 8. Photo and schematic of the location of tensiometers

حال برای بررسی وجود مکش تقریباً یکسان در نقاط مختلف خاک مرطوب، در هر رطوبت قبل از اجرای شمع و اعمال فشار کف، بعد از اجرای خاک با درصد تراکم نسبی ۳۳ درصد (نسبت منافذ ۰/۹۴) تانسومترها یکبار در یک تراز ارتفاعی (نوک تانسومترها در عمق ۵۵ سانتی متری) و یکبار در سه کد ارتفاعی مختلف (نوک تانسومترها در اعماق ۳۵، ۵۵ و ۷۵ سانتی متری) روی دستگاه اجرا و مکش قرائت می شود، تا از همگن و همسانگرد بودن تقریبی تغییرات مکش در کل دستگاه مطمئن شویم (شکل ۹ و ۱۰). حال بعد از به تعادل رسیدن و قرائت مکش، فشار کف ۱۰۰ کیلو پاسکال نیز اعمال می شود تا اثر آن نیز روی قرائت ها مشاهده شود. لازم به ذکر است که زمان لازم برای به تعادل رسیدن تانسومترها (ثابت شدن عدد مکش) بسته

شکل ۱۰. جانمایی محل تانسیومترها برای بررسی همسانگردی مکش

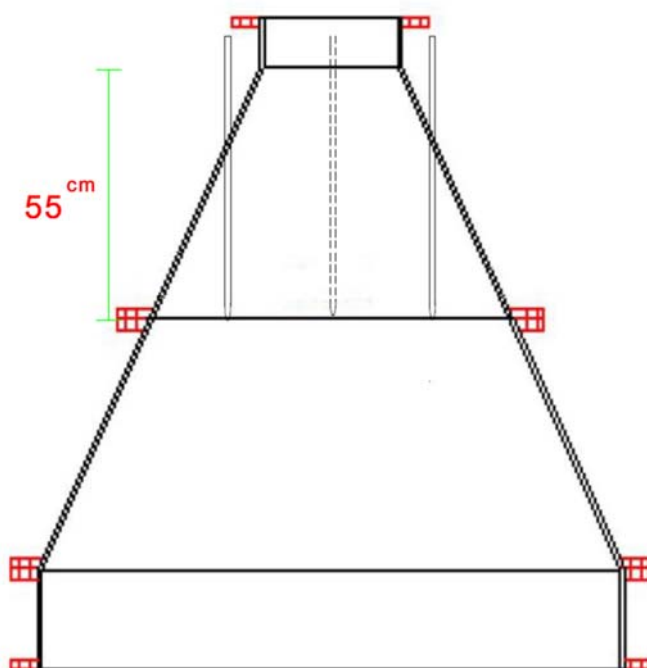


Fig. 10. Location of tensiometers to check matric suction isotropy

شکل ۱۱. مکش‌های قرائت شده مانند عمق ۵۵ سانتی متری در سه نقطه متقارن برای رطوبت ۵ درصد

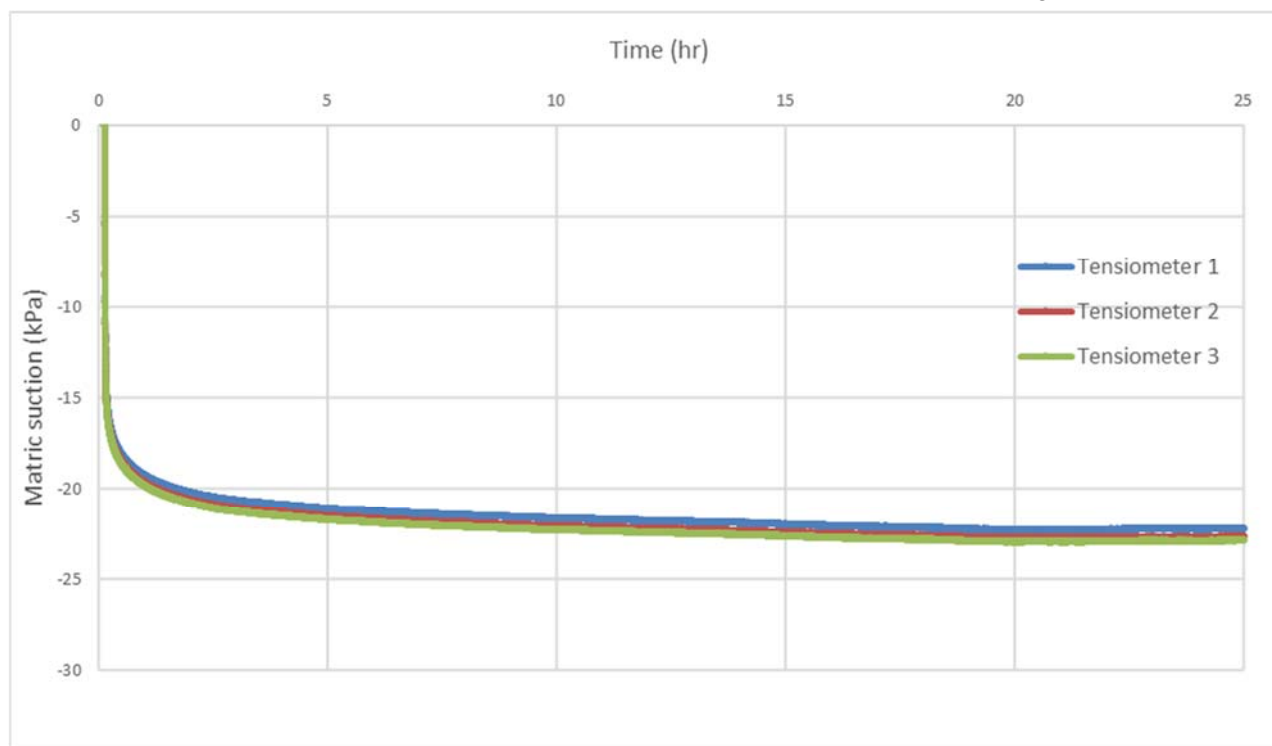


Fig. 11. Matric Suctions readings for depth of 55 cm in three-point symmetrical in moisture content of 5%

شکل ۱۲. مکش‌های قرائت شده در سه عمق ۳۵، ۵۵ و ۷۵ سانتی متری برای رطوبت ۵ درصد

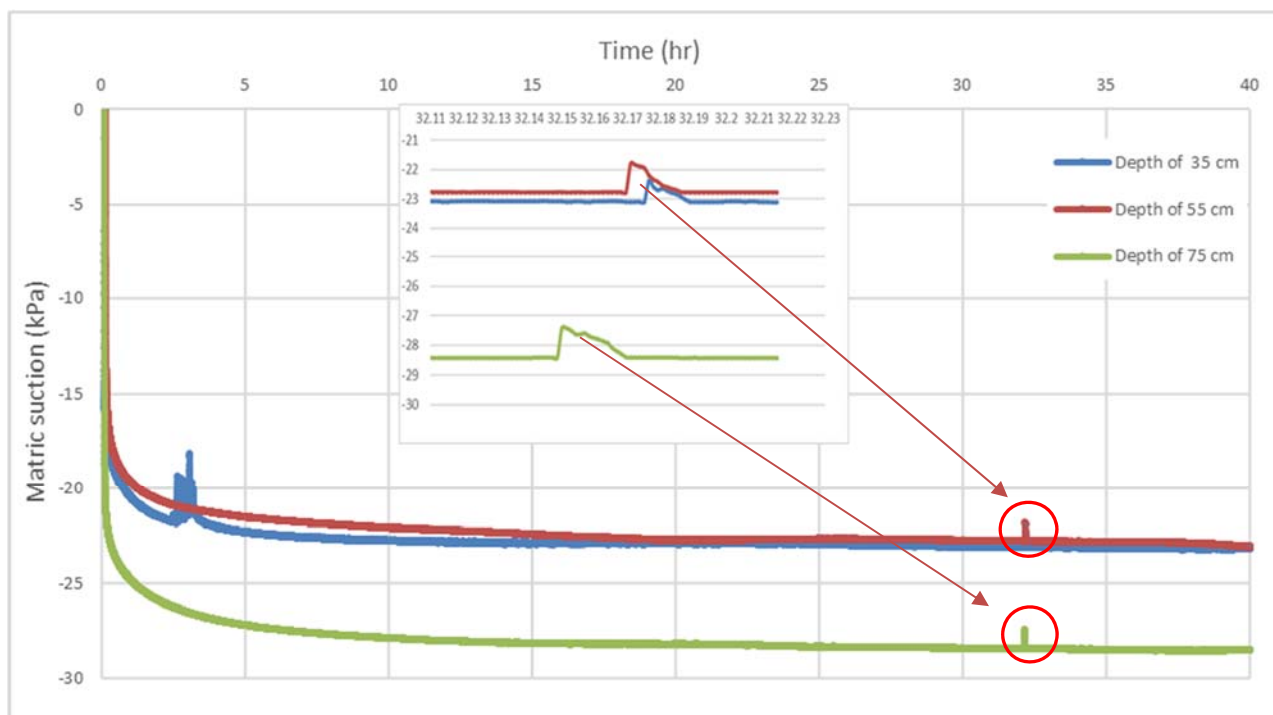


Fig. 12. Matric suction reading for depth of 35,55 and 75 cm in moisture content of 5%

۶- روند آزمایش

پس از تایید شدن همگن و همسانگرد بودن مقدار مکش بافتی خاک در دستگاه FCV-AUT، برای انجام آزمایش بارگذاری شمع، ابتدا باید با یک روش مناسب خاک با رطوبت و دانسیته مد نظر درون دستگاه اجرا شود. پس از بررسی روش‌های مختلف، با توجه به شکل خاص دستگاه، مشخص شد بهترین روش برای رسیدن به تراکم یکنواخت اجرای خاک به صورت لایه به لایه است. در این مقاله، اجرای شمع در خاک خشک و همچنین با رطوبت‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و دانسیته خشک (در همه حالات ثابت) 1.36 gr/cm^3 (درصد تراکم نسبی ۳۳ درصد) انجام شد تا در یک نسبت تخلخل یکسان تأثیر مکش بافتی بر رفتار نیرو-تغییر مکان شمع اجرا شده، بررسی شود.

برای اجرای خاک با بیشینه یکنواختی از نظر درصد تراکم نسبی در کل دستگاه، پس از سعی و خطا و استفاده از روش‌های مختلف، در نهایت روش اینگونه انتخاب شد که خاک به صورت لایه به لایه درون دستگاه ریخته شود به طوری که تراکم نسبی در هر لایه از پایین به سمت بالا تقریباً به صورت خطی افزایش

یابد (تراکم نسبی لایه‌های میانی برابر درصد تراکم مد نظر و تراکم نسبی لایه‌های پایینی و بالایی به ترتیب کمتر و بیشتر از درصد تراکم مد نظر). در حین انجام اینکار باید به این نکته توجه شود که با توجه به شکل مخروطی دستگاه، وزن لایه‌های مختلف اجرا شده می‌بایست با هم متفاوت بوده و از پایین به سمت بالا کاهش یابد ولی ضخامت همه لایه‌ها تقریباً ۱۰ سانتی متر است. بعد از ریختن هر لایه خاک، برای رسیدن به درصد تراکم نسبی مد نظر، آن لایه کمی با یک کوبه چوبی سبک کوبیده می‌شود. البته به دلیلی که قبلاً گفته شد، تعداد ضربات کوبه، از لایه‌های پایین به سمت بالا افزایش می‌یابد (افزایش تقریباً خطی). در نهایت نیز برای اطمینان از رسیدن خاک به تراکم نسبی مد نظر، از یک دستگاه SPT دستی استفاده شد و با توجه به عدد SPT بدست آمده، در بخش‌های مختلف دستگاه، درصد تراکم نسبی همواره بین عدد ۲۰ تا ۳۵ قرار گرفت. (عدد متناظر با خاک سست که هدف این پژوهش است). پس از اطمینان از این مطلب که، نمونه‌سازی با این روش درصد تراکم نسبی مد نظر ما را حاصل می‌کند، دستگاه تخلیه و دوباره با همان روش پر و برای آزمایش

آماده می‌شود. با توجه به حجم دستگاه وزن کل خاک ریخته شده برای پر کردن FCV بین ۷۷۲ کیلو گرم برای خاک خشک تا ۹۳۲ کیلوگرم برای رطوبت ۲۰ درصد، متغیر است که هر چه خاک مرطوب‌تر باشد تعداد لایه اجرا شده بیشتر می‌شود. بررسی تاثیر اجرا و بارگذاری شمع بر تغییرات مکش، با قرار دادن سه تانسیموتر در سه عمق مختلف، مطابق آنچه در بخش قبلی آمد، و قرائت مکش های بافتی انجام می‌گیرد.

همان‌گونه که در بخش ۳ آمد، شمع استفاده شده در این پژوهش، یک شمع فولادی انتها باز بوده که با استفاده از یک چکش فلزی و با روش کوبشی درون خاک اجرا شده است. در حین اجرای شمع مقادیر مکش نیز قرائت شد (برای خاک با رطوبت های مختلف) که به دلیل باز بودن انتهای شمع و عدم تغییر مکان قابل توجه در خاک، تغییر محسوسی در اعداد مشاهده نشد. پس از اجرای شمع با عمق نفوذ ۷۵ سانتی‌متر (۲۵ سانتی‌متر برای انجام بارگذاری بیرون از خاک می‌ماند) و قبل از شروع بارگذاری، فشار کف ۱ بار (۱۰۰ کیلو پاسکال) اعمال می‌شود. با قرار دادن سنسور تنش درون خاک و سنجش تغییرات تنش در عمق مشخص شده که این فشار کف، با توجه به دانسیته خاک (۱/۳۶) و درصد تراکم نسبی (۳۳ درصد) موجود، در تراز نوک شمع (۷۵ سانتی متر از بالا) تنش عمودی ۸۰ کیلو پاسکال قرائت شد. بنابراین با توجه به رابطه تنش در این عمق ($\gamma h = 13.34 * 0.75 = 10 \text{ kPa}$) و مقدار قرائت شده (عدد مقیاس ۸)، می‌توان شمع تا طول ۸ متر را درون دستگاه مدل نمود. بعد از به تعادل رسیدن فشار کف (حدود ۱۰ دقیقه) شمع بارگذاری می‌شود.

شکل ۱۳. سیستم بارگذاری در دستگاه FCV-AUT

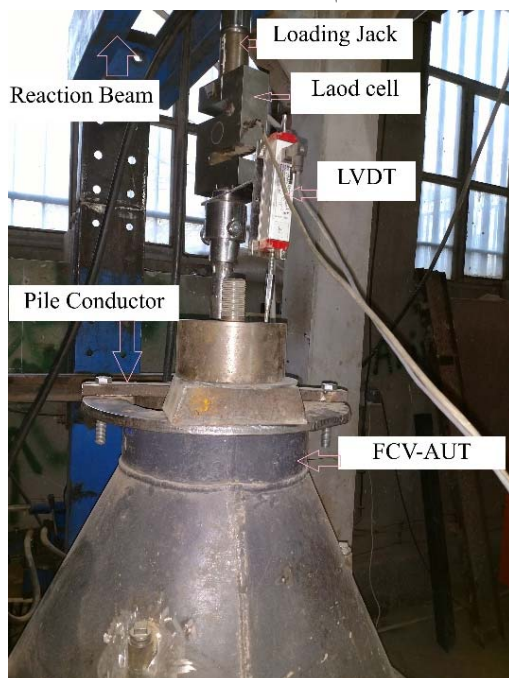


Fig. 13. Loading system apparatuses in FCV-AUT

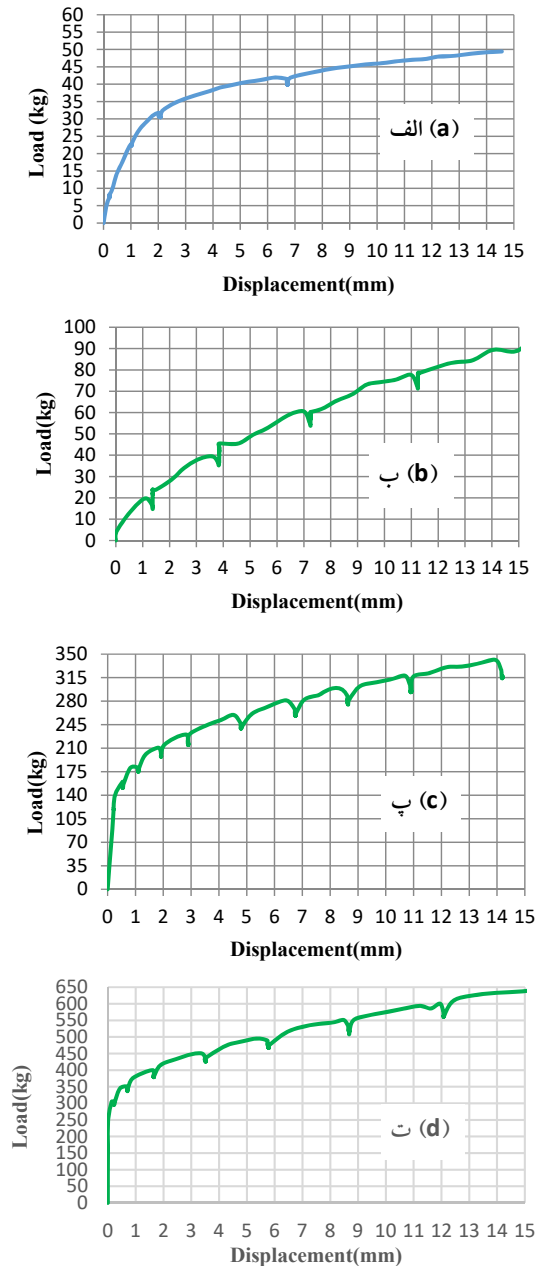
سیستم بارگذاری شامل یک فریم بارگذاری، پمپ دستی هیدرولیک و یک جک بارگذاری است. برای ثبت نیروی اعمالی و جابه‌جایی‌های متناظر با آن در طول آزمایش، به ترتیب از یک Load cell ۱۰۰ کیلو نیوتنی و LVDT با کورس جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۱۳). در این سیستم، داده‌ها از طریق یک دیتالاگر ۸ کاناله دریافت و به کامپیوتر منتقل می‌شود. برای اطمینان از قائم بودن راستای شمع در حین اجرا و بارگذاری، از یک هادی فلزی که بر سر FCV پیچ می‌شود، استفاده شده است. برای اطمینان از نرسیدن تنش به جداره‌ها قبل

۷- نتایج و تحلیل ها

مطابق آنچه در بخش قبلی گفته شد، برای حالت خشک و ۴ حالت خاک مرطوب، آزمایش بارگذاری شمع انجام و نمودار نیرو- تغییر مکان برای آنها مطابق شکل ۱۴ استخراج شد. میانگین مکش بافتی اندازه‌گیری شده در سه نقطه از دستگاه به عنوان مکش بافتی متناظر با هر رطوبت در نمودارها آمده که بر این اساس مکش بافتی (S) معادل رطوبت های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب ۲۵، ۱۰، ۷ و ۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. برای تخمین ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها از روی نمودار نیرو- تغییر مکان، روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده اما هیچگاه توافق نظری برای انتخاب بهترین روش وجود نداشته است. با توجه نمودارهای خروجی در این پژوهش و تحلیل آنها، روش ارائه شده توسط Das [27] برای شمع‌های کوبشی، یعنی بار متناظر با جابه‌جایی معادل با ۱۰ درصد قطر شمع (۳ سانتی‌متر) به عنوان ظرفیت باربری نهایی منظور می‌شود. همان‌گونه که در نمودارهای "الف" تا "ث" در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، منحنی نیرو- جابه‌جایی در ابتدا و تا قبل از رسیدن به رطوبت ۱۰ درصد پرش اولیه نداشته و دارای شیب اولیه کم هستند ولی از رطوبت ۱۰ درصد نمودار در ابتدا با یک افزایش ناگهانی در مقدار بار با شیب بالا مواجه می‌شود که شیب خط اولیه تا رطوبت ۱۵ درصد به بیشترین حد خود می‌رسد و سپس در رطوبت بیشتر (۲۰٪) شروع به کاهش می‌کند. علت این رفتار را می‌توان اینگونه توضیح داد که در رطوبت کم (زیر ۵ درصد) مقاومت جداره خیلی کم بوده و در واقع مقاومت جداره به طور کامل بسیج نمی‌شود ولی با افزایش درصد رطوبت خاک کم کم تماس بین شمع و خاک برقرار شده و مقاومت جداره (بخش اولیه نمودارها) نیز سهم خود را در مقاومت نهایی نشان می‌دهد این افزایش تا قبل از رطوبت ۲۰ درصد ادامه پیدا می‌کند ولی در رطوبت ۲۰٪ به علت کم شدن دوباره مقاومت جداره شمع با خاک، شیب و مقدار پرش اولیه رو به کاهش می‌رود. در شکل (۱۵) برای مقایسه بهتر، همه نمودارها بر اساس درصد

رطوبت (M.C_۱) و مکش بافتی (S) متناظر به صورت یکجا آمده است.

شکل ۱۴. نمودار نیرو-جابه‌جایی برای آزمایش بارگذاری شمع در درصد رطوبت های مختلف: الف) ۰٪ ب) ۵٪ پ) ۱۰٪ ت) ۱۵٪ ث) ۲۰٪



با مقایسه داده ها با نتایج حاصل از روابط تئوریک ارائه شده توسط Vanpalli مشخص شد، آزمایش انجام شده در این پژوهش، روند تغییرات ظرفیت باربری در مقابل مکش را با دقت خوبی تخمین می‌زند. همان‌گونه که در شکل (۱۶) آمده، با افزایش مقدار مکش بافتی ابتدا ظرفیت باربری نهایی شمع افزایش و بعد از رسیدن به یک مقدار حدی، کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به تفاوت رفتار خاک در مناطق مختلف منحنی مشخصه خاک مرتبط ساخت. منحنی مشخصه هر خاک با توجه به درصد رطوبتی که در بین دانه های آن وجود دارد دارای سه رژیم رفتاری پاندولی، طنابی و موینگی است [29]. حال بسته به دانه بندی، درصد رطوبت اولیه و درصد تراکم خاک رفتار خاک در این سه منطقه تغییر می‌کند. در خاک مورد آزمایش با توجه به درصد تراکم نسبی ۳۳ درصد و دانه بندی خاک، رفتار به گونه‌ای است که ابتدا با افزایش رطوبت (کاهش مکش) به علت محکم تر شدن ارتباط بین دانه‌ها با افزایش ظرفیت باربری مواجه می‌شویم ولی این افزایش تا یک رطوبت حدی (در این مورد خاص ۱۵ درصد رطوبت وزنی) ادامه پیدا می‌کند ولی بعد از آن با سست شدن ارتباط بین دانه‌ها ظرفیت باربری رو به کاهش می‌رود.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله با کمک مدل‌سازی فیزیکی یک شمع با انتهای باز داخل خاک ماسه لای دار و توسط دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV)، به بررسی تاثیر رطوبت و مکش بافتی بر ظرفیت باربری نهایی و رفتار نمودار نیرو- جابه‌جایی آن پرداخته شد. بدین منظور ابتدا با ایجاد تغییراتی روی نمونه ساخته شده از این دستگاه در دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT)، این امکان فراهم شد تا بتوان مکش بافتی را در سه عمق مختلف از خاک موجود در دستگاه اندازه‌گیری نمود. پس از درستی آزمایش از عملکرد دستگاه از نظر همگن و همسانگرد بودن مقادیر مکش در نقاط مختلف آن، با اجرا و بارگذاری شمع داخل پنج نمونه خاک با درصد رطوبت های مختلف و اعمال فشار کف ۱۰۰

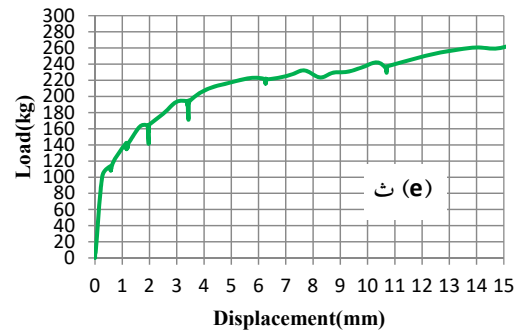


Fig. 14. Load-displacement curve for load test of pile at different moisture contents: a) 0 % b) 5 % c) 10 % d) 15 % e) 20 %

شکل ۱۵. نمودارهای مقایسه ای نیرو- جابه‌جایی برای شمع مدل

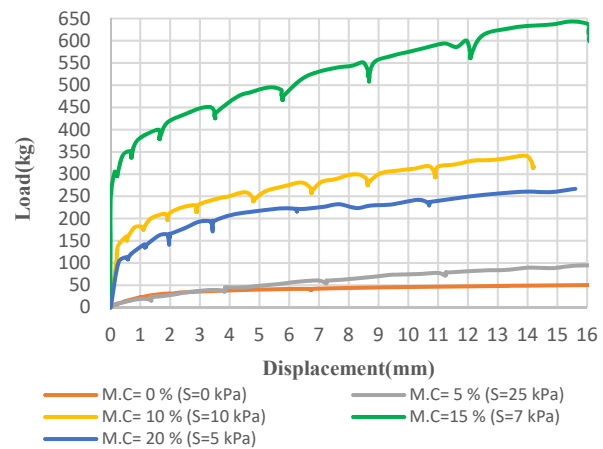


Fig. 15. Comparison curves of load-displacement for model pile

برای تعیین چگونگی تاثیر مکش بر ظرفیت باربری نهایی شمع، در شکل (۱۶) بار متناظر با جابه‌جایی ۳ میلی‌متر به عنوان ظرفیت باربری شمع، در مقابل مکش‌های مختلف ترسیم و با مقادیر بدست آمده از روابط تئوری ارائه شده توسط Vanapalli [28,7] مقایسه شده است.

شکل ۱۶. روند مقایسه‌ای تغییرات ظرفیت باربری شمع در مقابل مکش

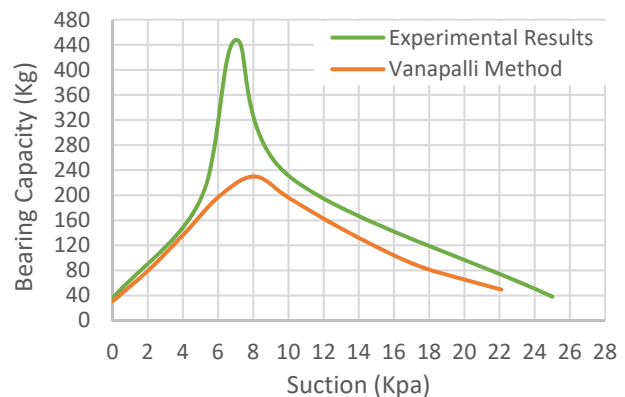


Fig. 16. Comparative trend of changes in pile bearing capacity versus matric suction

- compacted fine-grained unsaturated soil. In Proceedings of 14th Pan-Am Con. On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 64th Canadian Geotechnical Conf.
- [6] Vanapalli, S.K. and Taylan, Z.N. 2012. Design of single piles using the mechanics of unsaturated soils. *International Journal of GEOMATE*, 2(1): 197-204.
- [7] Vanapalli SK, Eigenbrod KD, Taylan ZN, Catana C, Oh WT, Garven E, "A technique for estimating the shaft resistance of test piles in unsaturated soils," in Proc. 5th Int. Conf. on UNSAT, 2010, pp. 1209-1216.
- [8] Hokmabadi, A., Fatahi, B., and Samali, B. (2015). "Physical modeling of seismic soil-pile-structure interaction for buildings on soft soils." *International Journal of Geomechanics.*, Vol. 15, Issue 2
- [9] McCabe, B., and Sheil, B. (2015). "Pile group settlement estimation: Suitability of nonlinear interaction factors." *International Journal of Geomechanics.*, Vol. 15, Issue 3
- [10] Zhuang, Y., and Cui, X. (2015). "Case studies of reinforced piled highspeed railway embankment over soft soils." *International Journal of Geomechanics.*, Vol. 16, Issue 2
- [11] Kog, Y. (2015). "Axially loaded piles in consolidating layered soil." *International Journal of Geomechanics.*, Vol. 16, Issue 1
- [12] Eslami, A., Veiskarami, M., and Eslami, M. M. (2012). "Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles-three case histories." *Int. J. Civil. Eng.*, 10(2), 100-111.
- [13] Zare, M. and Eslami, A. "Study of deep foundations performance by Frustum Conning Vessel (FCV)", *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 12(4), pp. 271-280, Tehran, Iran (2014).
- [14] Horvath, R.G. & Stolle, D. (1996). "Frustum For Testing Model Piles," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No.3, June, pp. 499-504.
- [15] Sedran, G. (1999). "Experimental and Analytical Study of a Frustum Confining Vessel". Doctoral Thesis, McMaster University
- [16] Mullins, G., Dapp, S., Fredrick, E., and Wagner, R. (2001) "Pressure Grouting Drilled Shaft Tips Phase I Final Report", Final Report Submitted Florida Department of Transportation, Florida.
- [17] Karimi, A., Eslami, A., Zarrabi, M., Khazaei, J. (2017). "Study of pile behavior by improvement of confining soils using frustum confining vessel", *Scientia Iranica*, 24(4), pp. 1874-1882.
- کیلو پاسکال، نمودارهای نیرو- جابه‌جایی استخراج و این نتایج به دست آمد:
- ۱- در خاک مورد آزمایش تا رطوبت ۵ درصد اصطکاک جانبی قابل توجهی بین شمع و خاک مشاهده نمی‌شود و مقاومت انتهایی، که حاصل از پلاگ شدن خاک داخل شمع است، بیشتر ظرفیت باربری شمع را تامین می‌کند.
- ۲- از رطوبت ۵ تا ۱۵ درصد کم‌کم اصطکاک جانبی بین شمع و خاک نیز بسیج شده و ضمن ایجاد یک پرش اولیه در نمودارها، باعث افزایش تصاعدی ظرفیت باربری شمع می‌شود. ولی از رطوبت ۱۵ درصد به بعد دوباره با کاهش این اصطکاک شیب اولیه رو به کاهش می‌رود.
- ۳- با در نظر گرفتن ظرفیت باربری نهایی شمع به عنوان بار متناظر با ۱۰ درصد جابه‌جایی سر شمع، تأثیر مکش بافتی بر تغییرات این پارامتر بررسی شد که مشخص شد با افزایش مقدار مکش بافتی ابتدا ظرفیت باربری نهایی شمع افزایش و بعد از رسیدن به یک مقدار حدی، کاهش می‌یابد. علت این پدیده تغییرات رفتار خاک مرطوب در مناطق مختلف منحنی مشخصه آب- خاک بوده و عوامل مختلفی مانند دانه‌بندی، درصد رطوبت اولیه و درصد تراکم خاک آنرا تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۹- مراجع

- [1] Poulos HG, "Pile behaviour-theory and application", *Géotechnique*, vol. 39, Sept. 1989, pp. 365-413.
- [2] Oloo, S.Y., Fredlund, D.G. and Gan J.K-M. (1997). "Bearing capacity of unpaved roads". *Canadian Geotechnical Journal*. 34(3): 398-407. Olson, R.E. and Denis, N.D. 1982
- [3] Mohamed, F.M.O. and Vanapalli, S.K. (2006). "Laboratory investigation for the measurement of the bearing capacity of unsaturated soils". In Proceedings of 59th Canadian Geotechnical Con. Vancouver, BC. pp. 1-4.
- [4] Oh, W.T. and Vanapalli, S.K. (2009). "A simple method to estimate the bearing capacity of unsaturated fine-grained soils". In Proceedings of 62nd Canadian Geotechnical Con. Halifax, pp. 234-241
- [5] Vanapalli, S.K. and Taylan, Z.N. 2011. Estimation of the shaft capacity of model piles in a

- [26] ASTM D1143. 2007. Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load. Annual Books of ASTM Standards, West Conshohocken, PA
- [27] Das BM (2016) Principles of Foundation Engineering, 8th edn. PWS Publishing Company, Boston, MA, USA
- [28] Vanapalli, S.K. and Taylan, Z.N. 2012. Design of single piles using the mechanics of unsaturated soils. International Journal of GEOMATE, 2(1): 197-204
- [29] Lu, N., Wu, B. and Tan, C.P. (2007) "Tensile strength characteristics of unsaturated sands", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 133, 144-154.
- [18] Zare, M. A. Eslami, A. Abrang, and A. Asadi. 2013. "Frustum confining vessel (FCV) for investigation of deep foundation performance". Proceeding of 38th Annual International Conference on Deep Foundation, Phoenix, AZ, USA, 545-553.
- [19] Amirhossein Mohammadi, Taghi Ebadi, Mohammad Reza Boroomand(2020). "Physical Modelling of Axial Compressive Bearing Capacity of Instrumented Piles in Oil-Contaminated Sandy Soil". Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 44:2, pages 695-714.
- [20] ASTM D422. 1999. Standard test method for particle size analysis of soils. Annual Books of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM D854. 1999. Standard test method for specific gravity of soils. Annual Books of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM D4253. 2006. Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. Annual Books of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM D4254. 2006. Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. Annual Books of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM D5298-16, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016,
- [25] Fredlund DG, Xing A(1994). "Equations for the soil-water characteristic curve", Can Geotech J;31:533-46

Effect of matric suction on pile behavior in unsaturated soils by physical modeling in FCV

M. Mortezaee^{1*}, S.A. Naeini², A.Eslami³

1- Ph.D. Student, Civil-geotechnical Eng. Dept., Imam Khomeini International University

2- Prof., Civil-geotechnical Eng. Dept., Imam Khomeini International University

3- Prof., Civil and Environmental Eng. Dept., Amirkabir University of Technology

* mortezaee_m06@yahoo.com

Abstract

Deep foundations are often used in a typical engineering project to transfer loads from heavy superstructures (bridges, highways, embankments and high-rise buildings) to the subsoil safely without subsidence or instability problems. In order to achieve an accurate and economical design in each of these projects, we must have a good understanding of how deep foundations behave, which can be done through analytical methods, numerical methods and experiments or experimental observations. Since a series of simplifications are usually performed in numerical and analytical methods, the use of experimental methods is selected to achieve a more desirable result. Experimental methods can be done by examining real models on site or performing experiments on a small-scale model in the laboratory (physical modeling), which due to lower cost, simplicity and reproducibility, usually physical modeling compared to Real on-site models are preferred. For physical modeling, various devices such as Simple Chamber (1 g), Calibration Chamber (CC) and centrifuge device can be used. The limitations and difficulties of these devices led to the recent introduction of a device called the Frustum Confining Vessel (FCV) for the physical modeling of deep foundations. In this device, which is in the form of an incomplete cone, by applying pressure to the bottom of the device, a linear stress gradient can be created along the central axis to be consistent with what is actually happening. Despite the many advantages that this device has, it does not have a system for measuring the matric suction in unsaturated soils. Therefore, in this article, by embedding precision instruments in the sample made of this device in Amirkabir University of Technology (FCV-AUT) and implementing and loading of a pile in the soil inside it, It is possible to study the behavior of piles in unsaturated soil and the effect of moisture and matric suction on the load-displacement curve. The pile used in this research is an open-end pile which was implemented by driving method in Firoozkooh silty sand with gravimetric moisture contents of 0, 5, 10, 15 and 20% and in each case a load-displacement curve was drawn. The floor pressure applied in this research is equal to 100 kPa, Which was determined by placing several stress sensors at different soil depths and measuring the stress changes in depth. The following results were obtained after experiments:

- 1- In the tested soil, up to 5% moisture content, no significant lateral friction is observed between the pile and the soil, and the end resistance, which is the result of plugging the soil inside the pile, provides most of the bearing capacity of the pile.
- 2- From 5 to 15% moisture content, the lateral friction between the pile and the soil is gradually mobilized and while creating an initial jump in the curve of load-displacement, it increases the bearing capacity of the pile exponentially. But from 15% moisture content onwards, the initial slope decreases again due to the reduction of lateral friction.
- 3- Considering the final bearing capacity of the pile as the load corresponding to 10% of the displacement of the pile head, the effect of matric suction on the changes of final bearing capacity was investigated. It was found that By increasing the amount of matric suction, first the final bearing capacity of the pile increases and after reaching a certain value, it decreases. The cause of this phenomenon is changes in wet soil behavior in different areas of the soil-water characteristic curve (SWCC) and is affected by various factors such as grain size, initial moisture content and soil density percentage.

Keywords: Pile, unsaturated soil, matric suction, ultimate bearing capacity, frustum confining vessel (FCV)