

## Investigation of Load-Displacement Behavior of Helical Pile in Wet and Saturated Condition with FCV Apparatus

Ali Jassim<sup>1</sup>, Navid Ganjian<sup>2\*</sup>, Abolfazl Eslami<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil, Architecture and Art, Science And Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil, Architecture and Art, Science And Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

### ABSTRACT

Nowadays, given to the scarcity of Oil and Gas resources onshore, and the increasing demand for construction of facilities in coastal areas the use of deep foundations for providing stability for marine infrastructures, such as Oil and Gas Drilling Rigs and Wind turbines, has gained an increasing attraction. Interests in research of helical piles have been arisen due to the advantages of such foundations. Physical modelling is one of the most common method in practice for performance evaluation of deep foundations which provides with the researcher the capability of repeatability. In addition, it is chip and easy-to-execute method compared to the in-situ pile loading tests. Frustum confining vessel (FCV), is one of the most effective tool for physical modeling approach. FCV has a conical shape, which can convert the vertical applied pressure to the base of the vessel, to horizontal stress and to produce a stress distribution similar to the idealized linear stress distribution of soil in situ. Consequently, each base pressure corresponds to a specific embedment depth in real-world. In this study, a new FCV device with an optimized dimensions with the capability of testing model piles in saturated soil samples was constructed. To the best of the author's knowledge, the newly constructed apparatus is the only FCV with this capability. After performance evaluation of the device, the load-displacement of a helical pile with one and three helices at different relative densities, both in wet and saturated sand, was evaluated. Results indicate that as the relative density increases the interlocking of the sand and helices increases which yields to an increase in the ultimate bearing capacity of pile. On the other hand, the bearing capacity reduces significantly in saturated sands. Also, increasing the number of helices significantly increases the bearing capacity of the helical pile.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 05 July 2022

**Revise Date:** 30 September 2022

**Accept Date:** 19 October 2022

### Keywords:

FCV Apparatus  
Anzali Sand  
Physical Modeling  
Helical Pile  
Saturated Sand

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.350470.2869>

\*Corresponding author: Navid Ganjian.

Email address: n.ganjian@srbiau.ac.ir

## بررسی رفتار بار - جابجایی شمع مارپیچ در ماسه مرطوب و اشباع با استفاده از دستگاه فشار مخروطی همه جانبه

علی جسیم<sup>۱</sup>، نوید گنجیان<sup>۲\*</sup>، ابوالفضل اسلامی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### چکیده

امروزه با توجه به کاهش یافتن منابع نفت و گاز در خشکی و افزایش روز افزون ساخت سازه‌های بلند مرتبه، استفاده از انواع پی‌های عمیق برای تأمین پایداری سکوه‌های نفتی و افزایش سرویس‌پذیری و کاهش نشست سازه‌های بلند مرتبه رو به افزایش می‌باشد. شمع مارپیچ یکی از انواع پی‌های عمیق می‌باشد که به واسطه مزایای خود، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از پرکاربردترین روش‌های ارزیابی عملکرد شمع‌ها، استفاده از مدلسازی فیزیکی می‌باشد که از نظر زمان، هزینه و قابلیت تکرارپذیری نسبت به انجام آزمایش‌های برجا، اولویت دارد. دستگاه فشار مخروطی همه جانبه (FCV) یکی از موثرترین روش‌های مدلسازی فیزیکی انواع شمع‌ها می‌باشد. این دستگاه شکل مخروطی داشته و با اعمال فشار از کف و به واسطه جداره مخروطی خود، توزیع تنش خطی مشابه با واقعیت در راستای محور دستگاه ایجاد می‌نماید. در نتیجه با اعمال هر فشار از کف، عمق مشخصی از خاک در نمونه‌ی درون دستگاه FCV مدلسازی می‌گردد. تاکنون چهار نمونه دستگاه FCV در دنیا ساخته شده و در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از پنجمین دستگاه ساخته شده در دنیا و تنها دستگاهی که قابلیت اشباع کردن نمونه را دارا می‌باشد رفتار بار-جابجایی شمع مارپیچ تک پره و سه پره در تراکم‌های گوناگون و در شرایط مرطوب و اشباع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش تراکم از سست به متوسط و از متوسط به متراکم ظرفیت باربری شمع مارپیچ را به ترتیب ۶۰ و ۲۳ درصد افزایش می‌دهد. از طرف دیگر اشباع شدن نمونه سبب کاهش ۷۵ درصدی ظرفیت باربری شمع می‌گردد. همچنین افزایش تعداد پره ظرفیت باربری شمع مارپیچ در نمونه‌ی مرطوب را تا ۱۶ درصد افزایش می‌دهد ولی برای نمونه‌های اشباع افزایش تعداد پره در ظرفیت باربری شمع مارپیچ تاثیر چندانی ندارد.

کلمات کلیدی: دستگاه FCV، ماسه‌ی انزلی، مدلسازی، شمع مارپیچ، ماسه اشباع.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.350470.2869">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.350470.2869</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.350470.2869	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۷/۲۷	۱۴۰۱/۰۷/۲۷	۱۴۰۱/۰۷/۰۸	۱۴۰۱/۰۴/۱۴
				نوید گنجیان	*نویسنده مسئول:	
				n.ganjian@srbiau.ac.ir	پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سیستم پی عمیق یا شمع، عموماً برای تقویت سازه‌های بلند مرتبه و مهم و با هدف ایجاد پایداری و افزایش سرویس‌پذیری آن‌ها به کار گرفته می‌شود [۱]. امروزه با توجه به افزایش تراکم و ارتفاع سازه‌های در دست احداث، استفاده از شمع‌ها در پروژه‌های عمرانی بسیار رایج بوده و انواع مختلفی از شمع‌ها جهت استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیکی موجود می‌باشند. شمع‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی از جمله: جنس شمع، نحوه‌ی نصب شمع، مقدار دست‌خوردگی خاک، عملکرد شمع از لحاظ باربری، شکل سطح مقطع شمع، محیطی که شمع در آن کار گذاشته می‌شود، زاویه‌ی استقرار شمع، طول شمع، سطح آب زیرزمینی و سازه‌ای که برای آن طراحی شده است، تقسیم بندی نمود [۲-۴]. انتخاب شمع مناسب با توجه به شرایط پروژه و مقتضیات آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد زیرا انتخاب بهینه‌ی جنس شمع، روش نصب و سایر مشخصات لازم برای شمع می‌تواند منجر به کاهش تعداد شمع مورد نیاز در پروژه، افزایش سرعت نصب، استفاده از تجهیزات کمتر برای نصب شمع و در نتیجه کاهش زمان پروژه و همچنین سبب کاهش مخاطرات طبیعی گردد؛ که در نتیجه‌ی تمامی این موارد هزینه‌های مربوط به انجام پروژه کاهش می‌یابد [۱]. بدین منظور پژوهش‌های بسیاری جهت بررسی انواع شمع توسط پژوهشگران انجام گرفته است تا با استفاده از نتایج آن بتوان شمع مناسب با توجه به شرایط ژئوتکنیکی و سازه‌ای را انتخاب نمود [۵].

شمع‌های مارپیچ<sup>۱</sup> یکی از انواع شمع‌ها می‌باشد که برای تحمل بارهای فشاری و کششی در سازه‌های بلند مرتبه، جاده‌ها و تأسیسات دریایی به کار می‌روند [۶]. سابقه‌ی استفاده از این نوع شمع‌ها به بیش از ۲۰۰ سال قبل باز می‌گردد. در آن زمان این نوع شمع به عنوان مهار برای سازه‌های ساحلی و فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گرفت [۷]. امروزه از شمع‌های مارپیچ، با هدف تحمل نیروی فشاری، کششی و بعنوان سازه‌ی مهاری در پروژه‌های بسیاری استفاده می‌شود [۸]. در زمان‌های قدیم تصور بر آن بوده‌است که این نوع شمع فقط برای خاک‌های ریزدانه مناسب می‌باشند. سکر<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۰ با انجام پژوهشی در کانادا و بررسی رفتار شمع‌های مارپیچ با قطر پره‌ی متفاوت اعلام نمود که با افزایش قطر پره، ظرفیت باربری شمع مارپیچ در خاک رس و ماسه افزایش می‌یابد [۹]. همچنین در پژوهشی دیگر دی‌برناردو<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۲ نشان داد که بر خلاف تصور عامه این نوع شمع‌ها در خاک‌های دانه‌ای، ریزدانه و حتی زمین‌های یخ زده کارایی لازم را داشته و با انتخاب قطر مناسب برای پره‌های این نوع شمع می‌توان از آن‌ها برای تحمل بار فشاری و کششی در انواع خاک‌ها استفاده نمود [۱۰]. شمه‌های مارپیچ از یک شفت مرکزی تشکیل می‌شوند که یک یا چند پره‌ی مارپیچ به این شفت مرکزی متصل می‌شود. قطر پره‌ها و فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر می‌تواند یکسان یا متفاوت باشد. از جمله مزایای شمع مارپیچ می‌توان به کاهش مخاطرات رایج ایجاد شده ناشی از ویبره، کوبش و ضربه نسبت به سایر انواع شمع‌ها اشاره نمود. لازم به ذکر است به دلیل روش اجرای نوین و صرفه‌ی اقتصادی، استفاده از این نوع شمع به عنوان پی عمیق در مناطق متراکم شهری و صنعتی نیز ممکن می‌باشد. یکی دیگر از قابلیت‌های شمع‌های مارپیچ، امکان افزایش طول شمع پس از اجرای شمع است که به نوبه‌ی خود مزیت بزرگی به شمار می‌آید [۱۱، ۱۲].

## ۲- مدلسازی فیزیکی

به منظور بررسی رفتار انواع شمع‌ها می‌توان از مدلسازی عددی، مدلسازی فیزیکی یا انجام آزمایش با مقیاس واقعی و مشاهدات میدانی استفاده نمود [۲]. انجام مدلسازی عددی برای بررسی رفتار شمع‌ها نیاز به ساده‌سازی‌های بسیاری برای تعیین شرایط مرزی و خصوصیات پیچیده‌ی مصالح ژئوتکنیکی دارد. از طرف دیگر انجام آزمایش بر روی مدل‌های واقعی شمع و مشاهدات میدانی با وجود اینکه بر روی مصالح واقعی انجام می‌شود ولی عدم کنترل بر شرایط آزمایش، عدم امکان بررسی پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری شمع به صورت جداگانه، هزینه‌ی بالا، زمان بر بودن و از بین رفتن شمع بعد از اتمام آزمایش و عدم امکان تکرار آزمایش سبب شده است تا استفاده از این روش برای بررسی رفتار شمع مقرون به صرفه نباشد [۱۳]. با توجه به هزینه‌ی بالای انجام آزمایش‌های میدانی و ساده‌سازی‌های در نظر

<sup>1</sup> Helical Piles

<sup>2</sup> Sakr

<sup>3</sup> Di Bernardo

گرفته شده در مدلسازی عددی، استفاده از مدلسازی فیزیکی برای بررسی رفتار شمع مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است [۱۴].

مدلسازی فیزیکی از موضوعات مهم و پیچیده در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد که از اواسط دهه ۱۹۵۰ مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته است. با استفاده از این روش می‌توان رفتار بار-جابجایی انواع شمع را با هزینه‌ای کمتر نسبت به آزمایش‌های میدانی انجام داد. همچنین در این روش از مصالح با خصوصیات واقعی خود استفاده می‌شود و نیازی به ساده‌سازی و در نظر گرفتن ساز و کار خاص برای گسیختگی خاک نمی‌باشد [۹،۶]. به همین دلیل در سال‌های اخیر برخی از جنبه‌های رفتاری شمع همچون مکانیزم انتقال بار، پاسخ محوری، روش نصب، تأثیر دست‌خوردگی خاک، با استفاده از مدلسازی فیزیکی ژئوتکنیکی توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفت [۱۵،۹]. دستگاه‌های مرسوم جهت مدلسازی فیزیکی شمع‌ها به دو دسته‌ی مدلسازی در سطوح تنش پایین همچون محفظه‌های ساده<sup>۴</sup> (lg) و مدلسازی در سطوح تنش بالا همچون مدلسازی در دستگاه محفظه‌ی کالیبراسیون<sup>۵</sup> (CC)، دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی<sup>۶</sup> (Ng) و دستگاه فشار مخروطی همه جانبه<sup>۷</sup> (FCV) تقسیم می‌شوند [۱۶]. مدلسازی فیزیکی با استفاده از محفظه‌ی ساده روشی ارزان و در دسترس برای مدلسازی فیزیکی شمع‌ها به حساب می‌آید، اما این دستگاه برای مدلسازی در سطوح تنش پایین به کار می‌رود و از آنجاییکه رفتار مکانیکی خاک به شدت به سطح تنش بستگی دارد این روش برای مدلسازی فیزیکی شمع‌ها کارایی لازم را نداشته و می‌تواند سبب تفسیر نادرست نتایج به دلیل رفتار غیرخطی خاک گردد [۱۷-۱۹]. با توجه به عدم توانایی دستگاه محفظه‌ی ساده در ایجاد گرادیان تنش واقعی توجه پژوهشگران به انجام مدلسازی در سطح تنش بالا معطوف گردید. مدلسازی در محفظه‌ی کالیبراسیون با وجود ایجاد تنش در سطوح بالا، گرادیان تنش یکنواخت ایجاد می‌نماید و به دلیل عدم توانایی در ایجاد گرادیان تنش افقی و قائم مطابق با واقعیت، تنها برای مدلسازی مسیره‌های تنش در عمقی مشخص و انجام مدلسازی آزمایش نفوذ مخروط (CPT) یا نفوذ استاندارد (SPT) کارایی دارد [۲۰-۲۲]. دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی معایب برشمرده برای محفظه‌ی ساده و محفظه‌ی کالیبراسیون را نداشته و با استفاده از آن می‌توان شمع با مقیاس کاهش یافته را تحت نیروهای سانتریفیوژ مورد بررسی قرار داد. با این وجود مدلسازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی به دلیل هزینه‌ی بالای انجام آزمایش و دسترسی محدود به این دستگاه، روشی مقرون به صرفه و در دسترس برای انجام مدلسازی فیزیکی به شمار نمی‌آید [۲۳-۲۶].

با توجه به محدودیت‌های روش‌های مرسوم مدلسازی فیزیکی و طیف وسیع کاربرد مدلسازی فیزیکی در مطالعه‌ی انواع شمع‌ها، در سال ۱۹۹۵ دستگاه فشار مخروطی همه جانبه یا FCV، با همکاری موسسه پی برمینگهام<sup>۸</sup> و دانشگاه مک مستر<sup>۹</sup> کانادا به عنوان روشی جدید برای مدلسازی فیزیکی شمع‌ها طراحی و ساخته شد [۲۸،۲۷]. این دستگاه به شکل مخروط ناقص بوده و فشار ثابت به کف آن اعمال می‌گردد. این فشار اعمالی در برخورد با جداری مایل مخروط، به دو مولفه‌ی افقی و قائم تبدیل می‌شود و توزیع تنش تقریباً خطی در راستای محور دستگاه ایجاد می‌نماید که این تنش مشابه با توزیع تنش ایجاد شده در عمق خاک در طبیعت می‌باشد [۱۴]. در نتیجه دستگاه FCV با شبیه‌سازی حالت تنش در طبیعت، به عنوان محیطی مناسب برای مدلسازی فیزیکی انواع شمع‌ها به شمار می‌رود. شماتیک این دستگاه و توزیع خطی ایجاد شده در راستای محور قائم دستگاه، به ترتیب در شکل ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است.

<sup>4</sup> Simple Chamber Apparatus

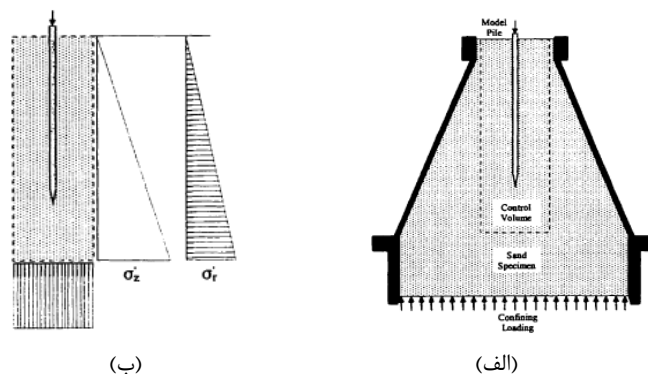
<sup>5</sup> Calibration Chamber Apparatus

<sup>6</sup> Geotechnical Centrifuge Apparatus

<sup>7</sup> Frustum Confining Vessel

<sup>8</sup> Berminghammer Foundation Equipment

<sup>9</sup> McMaster University

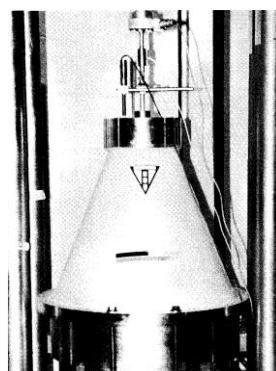


شکل ۱: الف) شماتیک دستگاه FCV دانشگاه مک مستر، ب) توزیع تنش خطی ایده آل درون دستگاه FCV [۱۴].

اولین دستگاه FCV با قطر دهانه‌ی بالایی و پایینی به ترتیب برابر با ۲۰۵ و ۴۹۵ میلی‌متر و ارتفاع کل ۵۷۹ میلی‌متر بوده ساخته شد که نمای آن در شکل ۲-الف نشان داده شده‌است [۲۸]. در طراحی اولیه‌ی این دستگاه، فشار از کف با استفاده از پیستون اعمال می‌گشت که سبب ایجاد تمرکز تنش در بخش پایینی نمونه می‌شد. سدران<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۹ برای ایجاد فشار یکنواخت‌تر در قسمت زیرین نمونه، روش اعمال بار از کف را از حالت پیستونی به بارگذاری به وسیله‌ی غشاء تغییر داد [۱۴]. در سال ۲۰۰۱ دومین نمونه‌ی دستگاه FCV با ارتفاع حدوداً ۱۳۷۲ و ابعادی بزرگتر نسبت به دستگاه اول برای امکان بررسی مقیاس‌های بزرگتر مشابه با شکل ۲-ب ساخته شد. مولینز<sup>۱۱</sup> و همکاران با استفاده از این دستگاه به بررسی اثر تزریق دوغاب سیمان بر ظرفیت باربری شمع‌ها پرداختند [۲۹]. در سال ۲۰۱۴ سومین دستگاه FCV توسط زارع و اسلامی به قطر دهانه‌ی بالایی و پایینی ۳۰۰ و ۱۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع کل ۱۳۰۰ میلی‌متر در دانشگاه امیرکبیر تهران ساخته شد. نمای این دستگاه در شکل ۲-ج نشان داده شده‌است. این پژوهشگران ظرفیت باربری مدل‌های شمع فولادی راندنی را با استفاده از دستگاه FCV برآورد نموده و با ظرفیت باربری حاصل از روابط تجربی مقایسه نمودند. نتایج این پژوهش نشان از کارایی دستگاه FCV در مدلسازی فیزیکی شمع داشته‌است [۱]. با استفاده از این دستگاه پژوهش‌های متنوعی انجام شده است؛ که در آن‌ها ظرفیت باربری انواع شمع و پارامترهای موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۳، ۳۰]. در سال ۲۰۲۱ چهارمین نمونه دستگاه FCV در دانشگاه صنعتی اصفهان توسط مرتضوی باک، حلبیان و هاشم‌الحسینی به بهره‌برداری رسید. این دستگاه دارای قطر بالایی و پایینی به ترتیب برابر با ۴۰۰ و ۱۸۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۹۶۰ میلی‌متر بوده و نمای این دستگاه در شکل ۲-د نشان داده شده است [۳۱]. با استفاده از این دستگاه مرتضوی باک و همکاران به بررسی رفتار شمع‌های مارپیچ مخروطی به روش تاگوجی پرداختند [۳۲].



(ب)



(الف)

<sup>10</sup> Sedran

<sup>11</sup> Mullins



(د)

(ج)

شکل ۲: دستگاه‌های FCV موجود در دنیا؛ الف) دانشگاه مک مستر کانادا [۲۸]، ب) دانشگاه فلوریدای جنوبی [۲۹]، ج) دانشگاه امیرکبیر تهران [۱]، د) دانشگاه صنعتی اصفهان [۳۱].

همانطور که پیشتر بیان شد، با استفاده از دستگاه FCV، می‌توان انواع شمع‌ها را در مقیاسی کاهش یافته مدل‌سازی نمود. برای تعمیم نتایج بدست آمده از مدل‌سازی در مقیاس کوچک، به واقعیت لازم است از ضرایب مقیاس استفاده شود. سدران و همکاران در سال ۲۰۰۱ با انجام پژوهش آنالیز مقیاس شمع‌ها تحت بارگذاری محوری، ضرایب مقیاس مناسب برای شمع‌ها تحت بارگذاری محوری را با توجه به خصوصیات دستگاه FCV و بر اساس نسبت طول نمونه مدل شده به طول نمونه واقعی برای هر یک از پارامترهای مورد نیاز مطابق با جدول ۱ پیشنهاد دادند [۱۴]. با استفاده از این ضرایب می‌توان نتایج مدل‌سازی فیزیکی را به نمونه واقعی تبدیل نمود و در طراحی شمع‌ها مورد استفاده قرار داد. این ضرایب مقیاس بیش از دو دهه مورد استفاده‌ی پژوهشگران مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱: مقادیر ضرایب تبدیل مقیاس مدل به نمونه‌ی اصلی بر اساس پیشنهاد سدران و همکاران [۱۴].

پارامتر	طول	مساحت	حجم	چگالی	جرم	تنش و کرنش	شتاب	نیرو	مدول الاستیسیته	زمان و میرایی
ضریب مقیاس	$\lambda = L_p/L_m$	$\lambda^2$	$\lambda^3$	1	$\lambda^3$	1	$1/\lambda$	$\lambda^2$	1	$\lambda$

با توجه به کارایی دستگاه FCV، پژوهش‌های بسیاری با استفاده از دستگاه‌های موجود برای بررسی رفتار انواع شمع‌ها انجام گرفته است. تمامی پژوهش‌های انجام گرفته تاکنون، بر روی نمونه‌ی ماسه در تراکم‌های مختلف و در درصد رطوبت پایین انجام گرفته است. با توجه به افزایش استفاده از پی‌های عمیق برای ایجاد پایداری و کاهش نشست در سازه‌های بلند مرتبه و تأسیسات مهم در مناطق ساحلی و نزدیک به ساحل و همچنین ساخت سکوه‌های نفتی در دریا، بررسی رفتار انواع شمع در نمونه‌ی ماسه با درصد رطوبت بالا ضروری می‌باشد. از طرفی در پروژه‌های نزدیک به ساحل و فراساحلی بدلیل تحت تأثیر قرار داشتن پروژه از شرایط دریا، تجهیزات مورد نیاز و سرعت نصب شمع در هزینه‌های پروژه بسیار تأثیرگذار می‌باشد و از طرف دیگر استفاده از انواع بتن و دوغاب سیمان از نظر زیست محیطی مطلوب نمی‌باشد. لذا شمع‌های مارپیچ با توجه به نصب به صورت دورانی و بدون نیاز به حفاری و تزریق یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در مناطق ساحلی و فراساحلی می‌باشد. در این راستا بدلیل ضرورت بررسی رفتار شمع‌های مارپیچ در محیط اشباع لازم است تا تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچ در شرایط اشباع مورد بررسی قرار گیرد تا با استفاده از آن بر اساس شرایط پروژه بتوان بهترین شمع را انتخاب نمود. در این پژوهش با استفاده از پنجمین دستگاه FCV در دنیا و سومین دستگاه FCV در ایران که تا زمان نگارش این مقاله تنها دستگاهی می‌باشد که قابلیت اشباع کردن نمونه را دارا می‌باشد، رفتار شمع‌های مارپیچ تک پره و سه پره در محیط مرطوب و اشباع مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۳- دستگاه FCV جدید

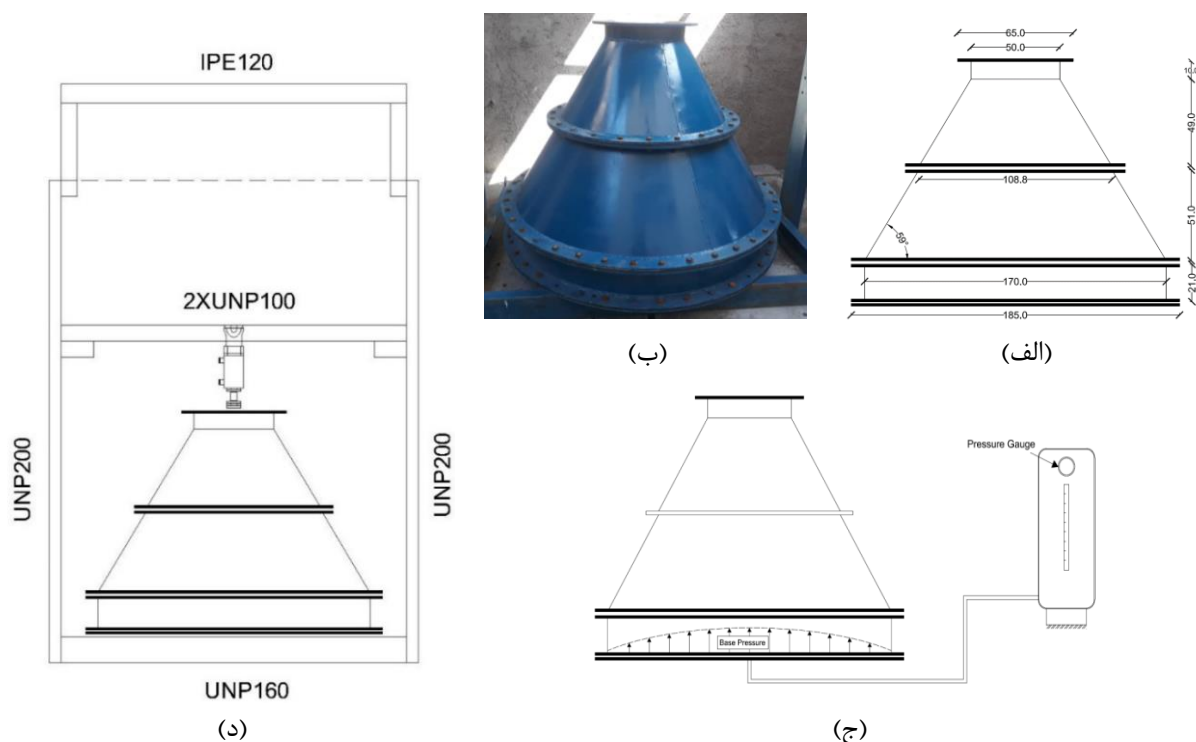
پنجمین دستگاه FCV موجود در سال ۲۰۲۲ توسط جسیم و همکاران به بهره‌برداری رسید [۳۳]. برای تعیین ابعاد بهینه‌ی این دستگاه از مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس<sup>۱۲</sup> استفاده گردید. در ابتدا کارایی این نرم افزار در مدلسازی دستگاه FCV مورد بررسی قرار گرفت. پس از در نظر گرفتن شرایط مرزی، تکمیل مدلسازی، کنترل نتایج حاصل از مدلسازی عددی با نتایج پژوهش‌های پیشین و کسب اطمینان از کارایی نرم افزار آباکوس در مدلسازی عددی دستگاه FCV، مدل‌های مختلف برای بررسی و انتخاب ابعاد دستگاه جدید مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته و برای سهولت در ساخت نمونه و مقیاس مدلسازی ارتفاع مدل‌های پیشنهادی ۱۰۰۰ میلی‌متر و مشابه با دستگاه امیرکبیر تهران، در نظر گرفته شد. با توجه به سایر پارامترهایی که بر توزیع تنش درون نمونه خاک موثر می‌باشند سه مقدار متفاوت برای قطر دهانه‌ی بالایی مخروط ناقص و سه مقدار متفاوت برای زاویه‌ی جداره‌ی دستگاه مطابق با جدول ۲ پیشنهاد شد و ۹ مدل پیشنهادی به همراه دستگاه دانشگاه امیرکبیر و مک مستر در نرم افزار آباکوس مدلسازی شد. با بررسی نتایج حاصل از مدلسازی نتیجه گرفته شد که افزایش زاویه‌ی جداره‌ی داخلی دستگاه توزیع تنش یکنواخت‌تری در راستای محور دستگاه ایجاد نموده و زاویه‌ی ۳۱ درجه جهت ساخت دستگاه انتخاب شد. از طرفی دیگر افزایش قطر دهانه‌ی بالایی دستگاه عمقی از ماسه که تحت تنش کششی قرار می‌گیرد را افزایش می‌دهد. با توجه به این که در کنار اشباع کردن نمونه، کاهش خطای نمونه‌سازی و امکان بررسی انواع شمع‌ها و ستون سنگی و همچنین اعمال بارگذاری جانبی به شمع از اهداف اصلی ساخت دستگاه جدید بوده است، قطر دهانه‌ی ۵۰۰ میلی‌متر به عنوان قطر دهانه‌ی بالایی انتخاب شد. جزئیات مدلسازی با استفاده از نرم افزار آباکوس و نتایج تحلیل مدلسازی عددی در پژوهش جسیم و همکاران به طور کامل شرح داده شده است [۳۳].

جدول ۲: مدل‌های عددی بررسی شده جهت تعیین ابعاد بهینه.

Model9	Model8	Model7	Model6	Model5	Model4	Model3	Model2	Model1	AUT	Mc Master	نام مدل
۳۱			۲۷			۱۸			۲۶/۶	۳۵	زاویه مخروط (درجه)
۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰	قطر دهانه (mm)
۱۸۰۰	۱۷۰۰	۱۶۰۰	۱۶۲۰	۱۵۲۰	۱۴۲۰	۱۲۵۰	۱۱۵۰	۱۰۵۰	۱۳۰۰	۱۷۰۰	قطر کف (mm)

این دستگاه از شش بخش اصلی تشکیل شده است. بخش اول بدنه‌ی دستگاه می‌باشد که شماتیک آن در شکل ۳-الف و نمای ساخته شده‌ی آن در شکل ۳-ب نشان داده شده است. این بخش از دو نیم مخروط ناقص بالا و پایینی به ارتفاع مجموعاً ۱۰۰۰ میلی‌متر و بخش استوانه‌ی پایینی به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر تشکیل می‌شود. همانطور که در بخش‌های پیشین اشاره شد در این دستگاه فشار از کف توسط غشای لاستیکی مشابه با شماتیک شکل ۳-ج اعمال می‌شود که این فشار اعمالی مقیاس مدلسازی را تعیین می‌نماید. استوانه‌ی زیرین که بر روی غشای پلاستیکی قرار می‌گیرد و از نمونه‌ی ماسه با تراکم مورد نظر پر می‌شود، سبب می‌شود که توزیع تنش اعمال شده از کف به صورت یکنواخت‌تری به نمونه‌ی اصلی اعمال گردد. لازم به ذکر است که در قسمت بالایی این دستگاه استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر به نیم مخروط ناقص بالایی جوش شده است تا در حین نصب شمع درون دستگاه و اشباع نمونه میزان بالازدگی خاک و آب در صورت وجود مشخص گردد. بدین ترتیب ارتفاع کل بدنه‌ی اصلی دستگاه FCV معادل با ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بخش دوم دستگاه FCV، قاب دستگاه می‌باشد که از یک شاسی مستطیل شکل به طول و عرض ۲۱۵ و ۱۶۰ سانتیمتر تشکیل می‌گردد که بدنه‌ی اصلی دستگاه بر روی آن قرار می‌گیرد. قاب بارگذاری نیز که وظیفه‌ی تأمین نیروهای عکس العمل مورد نیاز برای جابجایی‌ها و اعمال بار محوری بر روی شمع را برعهده دارد، از تیر آهن و ناودانی مطابق با شکل ۳-د ساخته شده است [۳۳].

<sup>12</sup> Finite Element Analysis by Abaqus Software



شکل ۳: اجزای دستگاه FCV جدید؛ (الف) شماتیک دستگاه FCV؛ (ب) دستگاه FCV ساخته شده، (ج) سیستم فشار از کف، (د) شاسی و قاب بارگذاری.

بخش سوم این دستگاه، تجهیزات مربوط به اعمال فشار از کف می‌باشد که از کمپرسور هوای فشرده به ظرفیت ۲۵۰ لیتر، مخزن آب و هوا، رگلاتور و متعلقات آن تشکیل شده است. برای اعمال فشار از کف مورد نظر، هوای فشرده از طرف کمپرسور به بخش بالایی مخزن آب و هوا وارد شده و معادل آن، آب از بخش زیرین مخزن خارج شده و به بخش زیرین غشا اعمال می‌گردد. بخش چهارم این دستگاه تجهیزات مربوط به رانش شمع ماریچ به درون نمونه‌ی ماسه‌ای و اعمال بارگذاری محوری بر روی آن می‌باشد. با توجه اینکه شمع ماریچ به صورت پیچشی نصب می‌شود، برای نصب شمع درون ماسه از جک پیچشی سرووالکتریک استفاده شده است. همچنین برای اعمال بارگذاری محوری بر روی شمع، جک بارگذاری هیدرولیکی با ظرفیت بارگذاری ۱۰۰ کیلو نیوتن مورد استفاده قرار گرفت. بخش پنجم این دستگاه تجهیزات ثابت داده‌ها می‌باشد که شامل نیروسنج S شکل با ظرفیت ۱۰ تن، خط کش پتانسیومتری با دامنه‌ی بیشینه‌ی ۱۵۰ میلی‌متر و دستگاه ثبت داده‌ها هشت کاناله با رزولوشن ۲۴ بیت می‌باشد. نمای تجهیزات اندازه‌گیری نیرو و جابجایی در شکل ۴-الف و ۴-ب نشان داده شده است. بخش ششم این دستگاه تجهیزات مربوط به اشباع کردن نمونه می‌باشد. بدین منظور لازم است تمامی درزهای دستگاه آب بند شوند که این مهم با استفاده از چسب سیلیکونی و تعبیه پیچ‌های سفت کننده در محل اتصال اجزای دستگاه به هم صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است دهانه‌ی بالایی برای امکان زهکشی در حین انجام مدلسازی باز می‌باشد. پس از بررسی‌های به عمل آمده شیرهای ورودی آب به صورت متقارن و در بخش پایینی دستگاه نصب شد تا با ورود آب-با دبی کم- علاوه بر امکان خروج هوای محبوس شده بین ذرات خاک از قسمت بالایی دستگاه، تراکم نمونه نیز دستخوش تغییرات اساسی و تاثیرگذار نگردد. بدین ترتیب با ورود آب با دبی کم و در حدود ۰/۲ لیتر بر دقیقه، نمونه به مرور زمان از بخش پایینی اشباع می‌گردد و زمانیکه سطح آب بر روی نمونه مشاهده گردید ورودی آب بسته شده و به نمونه اجازه داده می‌شود تا بصورت غرقابی به شرایط اشباع نزدیک گردد. فرآیند آماده‌سازی و اشباع نمودن نمونه، حدود ۴ الی ۵ روز-بسته به تراکم نمونه- به طول می‌انجامد. توضیحات بیشتر در رابطه با جزئیات این فرآیند، در مقاله جسیم و همکاران (۲۰۲۲) بیان شده است [۳۳].





(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف) نیروسنج و جابجایی سنسج، ب) دیتالاگر ثبت داده ها، ج) شیر ورودی آب برای اشباع.

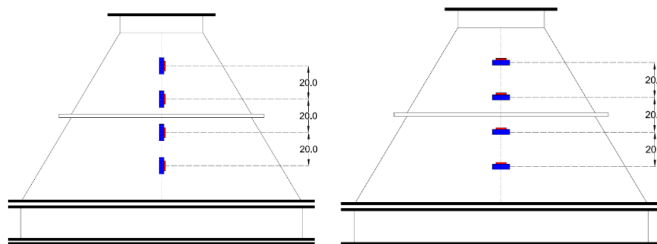
## ۴- روش تحقیق

### ۴-۱- صحت سنجی کارایی دستگاه

قبل از انجام مدل‌سازی فیزیکی شمع ماریچج، جهت حصول اطمینان از میدان تنش ایجاد شده درون نمونه‌ی خاک چهار سنسور فشارسنج در فواصل ۲۰ سانتیمتری از هم، یکبار به صورت افقی و یکبار به صورت قائم در حین نمونه‌سازی در راستای محور دستگاه قرار داده شد. به منظور سنسج میدان تنش قائم، سنسورها به صورت افقی (طبق شکل ۵-الف) و برای سنسج میدان تنش افقی، سنسورها به صورت قائم (طبق شکل ۵-ب) قرار گرفتند. نمای سنسور قائم در حین ساخت نمونه در شکل ۵-ج نشان داده شده است. پس از اتمام نمونه‌سازی، فشار از کف ۱۲۱ و ۲۰۰ کیلوپاسکال در آزمایش‌های جداگانه، از کف اعمال شده و تنش قرائت شده‌ی هر سنسور ثبت گشته و توزیع تنش افقی و قائم به ازای هر فشار از کف مشابه با شکل ۶ رسم می‌گردد. بدین ترتیب به ازای هر تراکم و به ازای دو فشار از کف مورد نظر، در دو آزمایش جداگانه، یکبار سنسورها به صورت افقی و بار دیگر به صورت قائم در کدهای ارتفاعی مشخص قرار داده شده و توزیع تنش افقی و قائم ثبت شد. سپس مقادیر ثبت شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی عددی در نرم افزار آباکوس مقایسه شد. این مقایسه برای ماسه‌ی متراکم در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، توزیع تنش افقی و قائم قرائت شده توسط سنسورهای کار گذاشته شده درون نمونه با تقریب قابل قبولی خطی می‌باشد و همچنین مقادیر قرائت شده توسط سنسورهای کار گذاشته شده با مقادیر پیش‌بینی شده در مدل‌سازی عددی مطابقت خوبی از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان با استفاده از دستگاه FCV، شمع‌های ماریچج را در مقیاس کاهش یافته مدل‌سازی نمود.



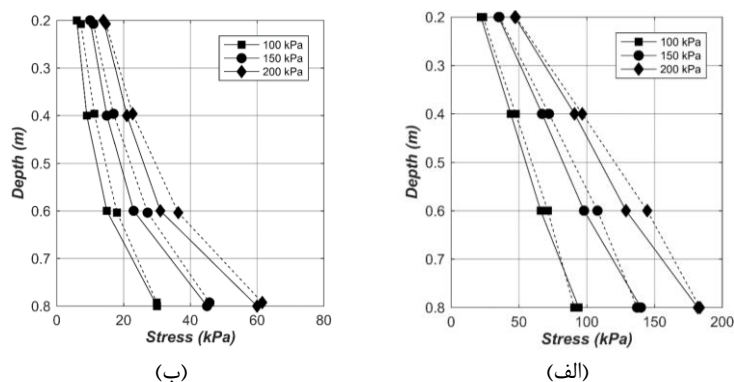
(ج)



(ب)

(الف)

شکل ۵: شماتیک نحوه قرارگیری سنسور فشار، الف) اندازه‌گیری تنش قائم، ب) اندازه‌گیری تنش افقی، ج) سنسور قائم در حین ساخت نمونه.



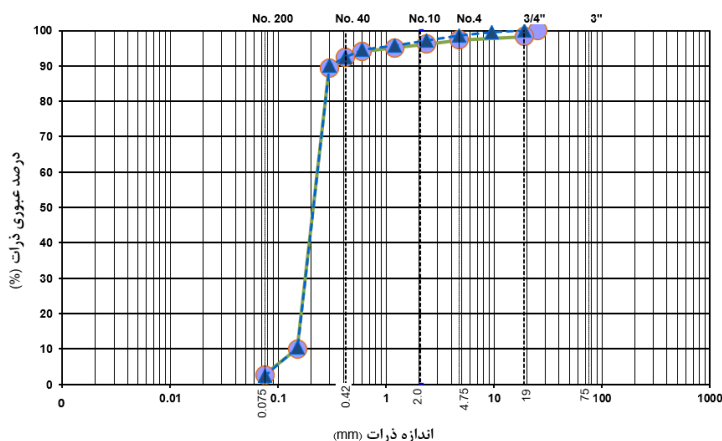
شکل ۶: مقایسه‌ی بین توزیع تنش ایجاد شده در راستای محور دستگاه FCV، در مدلسازی فیزیکی و مدلسازی عددی، الف) توزیع تنش قائم، ب) توزیع تنش افقی.

## ۴-۲- مصالح مصرفی

از آنجاییکه وجود اصطکاک بین دانه‌های خاک و جداره‌ی مخروطی دستگاه FCV، نقش اصلی را در ایجاد تنش افقی ایفا می‌نماید، کارایی این دستگاه در سیستم شمع و خاکی که عملکرد اصطکاکی آن به عملکرد چسبندگی غالب باشد نمایان خواهد شد. در نتیجه استفاده از دستگاه FCV برای مدلسازی شمع‌های اصطکاکی در خاک ماسه مناسب‌تر می‌باشد. جهت انجام آزمایش‌های این پژوهش از ماسه‌ی سواحل انزلی واقع در شمال ایران در سه تراکم سست (۲۵٪-۲۰٪)، متوسط (۵۰٪-۴۵٪) و متراکم (۷۰٪-۶۵٪) استفاده شده‌است. این ماسه بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید در دسته‌ی ماسه بد دانه بندی شده (SP) قرار دارد و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۷ نشان داده شده است. سایر آزمایشات لازم جهت شناسایی مشخصات فیزیکی و مکانیکی از جمله آزمایش تعیین وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک، آزمایش تعیین وزن مخصوص کمینه و بیشینه، آزمایش سه محوری و آزمایش برش مستقیم بر روی این ماسه، طبق استاندارد ASTM انجام شده و نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است [۳۹-۳۴]. لازم به ذکر است با توجه به حجم بالای نمونه، آزمایشات به تعداد کافی و با نمونه‌گیری تصادفی از تمامی نمونه‌ی ماسه انجام گرفته است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی ماسه انزلی.

name	Gs	Cu	D <sub>60</sub>	مشخصات مقاومتی				e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	(γ <sub>d</sub> ) min (KN/m <sup>3</sup> )	(γ <sub>d</sub> ) max (KN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )		
				φ			C					Loose	Medium	Dense
				Loose	Medium	Dense								
SP	۲/۶۹	۱/۶۲	۰/۲۴	۳۱	۳۴	۳۶	۳	۰/۹۸	۰/۷۱	۱۳/۳۶	۱۵/۴۶	۱۳/۷۷	۱۴/۲۷	۱۴/۷



شکل ۷: منحنی دانه‌بندی ماسه انزلی.

### ۳-۴- شمع مورد استفاده

در این پژوهش از شمع ماریپیچ تک پره و سه پره با قطر شفت و قطر پره به ترتیب ۳۲ و ۹۰ میلیمتر مشابه با شکل ۸ استفاده شده است. در شمع سه پره نسبت فاصله (S/D) مقدار ثابت ۱/۵ می‌باشد و همچنین فشار از کف در نظر گرفته شده برای حالت مرطوب برابر با ۲۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است که معادل با عمق مدلسازی حدوداً ۱۳ الی ۱۴ متر (بسته به تراکم نمونه) می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی اثر اشباع بر ظرفیت باربری شمع ماریپیچ انجام گرفته است. بدین ترتیب لازم است مقیاس مدلسازی در آزمایش‌های مرطوب و اشباع یکی باشد. با توجه به کاهش وزن مخصوص اشباع ماسه لازم است در حالت اشباع فشار از کف کمتری اعمال گردد تا ضریب مقیاس در دو حالت یکسان باشد. با توجه به عمق مدلسازی مشابه با شرایط مرطوب و با استفاده از روابط مکانیک خاک، فشار از کف ۱۲۱ کیلوپاسکال برای آزمایش‌های اشباع محاسبه شد. بدین ترتیب با اعمال فشار از کف ۲۰۰ کیلوپاسکال در شرایط مرطوب و اعمال فشار از کف ۱۲۱ کیلوپاسکال در شرایط اشباع، مدلسازی فیزیکی برای هر تراکم مورد نظر در عمقی یکسان انجام می‌گیرد.



شکل ۸: شمع ماریپیچ تک پره و سه پره جهت مدلسازی فیزیکی در دستگاه FCV.

### ۴-۴- ساخت نمونه

ساخت نمونه در این پژوهش به صورت اجرای لایه‌های خاک به ارتفاع ۵ سانتیمتر می‌باشد. بدین ترتیب ۴ لایه خاک در بخش استوانه‌ای زیرین و ۲۰ لایه در بخش مخروط ناقص اجرا شد. برای دستیابی به تراکم مورد نظر در هر آزمایش، با توجه به حجم هر یک از این لایه‌ها و وزن مخصوص مرطوب ماسه (در تراکم مورد نظر)، وزن خاک مورد نیاز برای هر یک از لایه‌ها محاسبه می‌شود. سپس خاک با ترازو با دقت ۰/۱ گرم برای هر لایه و به درون دستگاه منتقل شده و تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر متراکم می‌شوند. برای کنترل بهتر ارتفاع هر لایه، جداره‌ی داخلی دستگاه به فواصل ۵ سانتیمتری مشابه با شکل ۹-الف مدرج شده است. لازم به ذکر است در حالت سست، با اعمال ضربه به بدنه دستگاه، در نمونه با تراکم متوسط با اعمال فشار دست (مشابه با شکل ۹-ب) و در حالت متراکم با استفاده از کوبه چوبی نمونه‌ی ماسه به ارتفاع تعیین شده و تراکم مورد نظر می‌رسد. بعد از اجرای هر لایه و قبل از اجرای لایه‌ی بعدی سطح خاک خراشیده می‌شود تا اتصال بین لایه‌ها بهتر صورت گیرد. لازم به ذکر است برای اطمینان از یکنواختی تراکم لایه‌های اجرا شده، لایه‌ها به روش تراکم کاهش یافته متراکم شدند [۴۰].

برای اشباع کردن نمونه در ابتدا تمامی درزهای دستگاه با استفاده از چسب سیلیکونی و سفت کردن پیچ‌های اتصال آب بند گردید. به منظور تأمین آب مورد نیاز برای اشباع شدن نمونه، یک مخزن آب با ظرفیت ۲۰ لیتر در ارتفاع ۲۵۰ سانتیمتری از کف زمین تعبیه شد که توسط دو شلنگ به دو شیر در قسمت انتهایی دستگاه متصل می‌شوند. دبی ورودی آب باید آنقدر کم باشد که تراکم نمونه بر هم نخورد. بدین منظور با انجام آزمایشات سعی و خطا دبی مجموع ۰/۲ لیتر بر دقیقه (۰/۱ لیتر بر دقیقه برای هر شیر ورودی) در نظر گرفته شد. قبل از ورود آب به نمونه دبی آب ورودی مشابه با شکل ۹-ج کنترل می‌گردد.



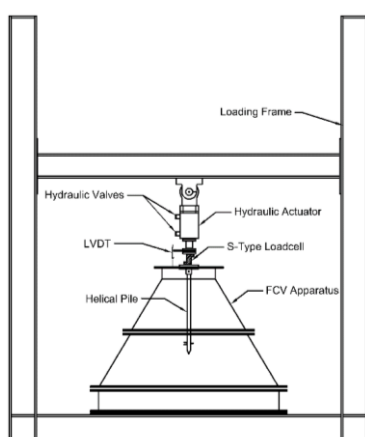
شکل ۹: روند ساخت و اشباع نمونه؛ (الف) کنترل ارتفاع؛ (ب) متراکم کردن؛ (ج) کنترل دبی خروجی برای اشباع کردن نمونه.

#### ۵-۴- انجام آزمایش

در این پژوهش مدلسازی فیزیکی شمع ماریچ تک پره و سه پره در سه تراکم سست، متوسط و متراکم برای نمونه‌ی ماسه با رطوبت ۴ درصد و اشباع انجام گرفته است. در مجموع ۱۲ آزمایش مطابق جدول ۴ انجام گرفته است. پس از ساخت نمونه با تراکم مورد نظر و اشباع نمونه (در ۶ آزمایش اشباع) فشار از کف در گام‌های بارگذاری ۲۰ کیلوپاسکال تا دست‌یابی به فشار از کف مورد نظر افزایش می‌یابد. اعمال پلکانی فشار از کف و وقفه‌ی بین گام‌های اعمال فشار برای برهم نخوردن تراکم نمونه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در نمونه‌های اشباع بدلیل ایجاد فشار آب منفذی در نمونه پس از اعمال هر گام بارگذاری، باید با محاسبه‌ی زمان لازم برای زهکشی فشار آب منفذی ایجاد شده فاصله‌ی زمانی بین گام‌های افزایش فشار تعیین گردد. بدین ترتیب در نمونه‌های مرطوب فاصله‌ی بین اعمال هر گام بارگذاری ۱۰ دقیقه و در نمونه‌های اشباع فاصله‌ی بین هر گام بارگذاری ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد. پس از اعمال فشار از کف، شمع ماریچ در حضور نیروی قائم به وسیله موتور پیچشی وارد نمونه ماسه می‌گردد. این بار محوری فشاری مطابق با استاندارد ASTM-D1143 به سر شمع اعمال می‌گردد. طبق استاندارد فوق، در هر گام بارگذاری باید معادل با ۵ درصد ظرفیت باربری پیش‌بینی شده برای شمع اعمال شود و همچنین فاصله‌ی بین گام‌های بارگذاری بین ۴ تا ۱۵ دقیقه قرار داشته باشد [۴۱]. در این پژوهش بار محوری اعمال شده بر سر شمع، در هر گام به مقدار ۳ کیلونیوتن افزایش یافته و برای نمونه‌های مرطوب فاصله‌ی بین گام‌های بارگذاری ۱۰ دقیقه و در آزمایش‌های اشباع فاصله‌ی اعمال هر گام با توجه به مشخصات زهکشی ماسه ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شده است تا فشار آب منفذی ایجاد شده در نمونه اجازه‌ی زهکشی پیدا کند. جهت کنترل نصب قائم شمع، از درپچه‌ای استفاده شده است که بر روی دهانه‌ی بالایی دستگاه قرار می‌گیرد. نمای این درپچه و شمع در حین نصب شدن در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است. نیروی فشاری اعمالی به سر شمع تا دست‌یابی به جابجایی حدود ۵۰ درصد قطر پره، اعمال می‌گردد و همزمان قرائت نیرو و جابجایی توسط دیتالاگر ثبت شده و همزمان منحنی بار-جابجایی بر روی سیستم نشان داده می‌شود. مشابه با اعمال فشار از کف، در حین اعمال بار محوری فشاری بر روی شمع‌ها در حالت اشباع لازم است فاصله‌ی بین گام‌های بارگذاری افزایش یابد تا فشار آب منفذی ایجاد شده درون نمونه زهکشی شود. نمایی از تجهیزات ثبت داده تعبیه شده در حین اعمال بار محوری و شماتیک نحوه‌ی عملکرد این آزمایش به ترتیب در شکل ۱۰-ب و ۱۰-ج نشان داده شده است.

جدول ۴: برنامه آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	تراکم (%)	تعداد پره	رطوبت نمونه (%)	قطر پره (mm)	فشار کف (kPa)
BKP-No.1	سست	۱	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.2		۳	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.3	متوسط	۱	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.4		۳	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.5	متراکم	۱	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.6		۳	٪۴	۹۰	۲۰۰
BKP-No.7	سست	۱	اشباع	۹۰	۱۲۱
BKP-No.8		۳	اشباع	۹۰	۱۲۱
BKP-No.9	متوسط	۱	اشباع	۹۰	۱۲۱
BKP-No.10		۳	اشباع	۹۰	۱۲۱
BKP-No.11	متراکم	۱	اشباع	۹۰	۱۲۱
BKP-No.12		۳	اشباع	۹۰	۱۲۱



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۰: الف) راندن شمع مارپیچ به درون نمونه؛ ب) تجهیزات اعمال بار، قرائت نیرو و جابجایی سر شمع؛ ج) شماتیک عملکرد دستگاه FCV.

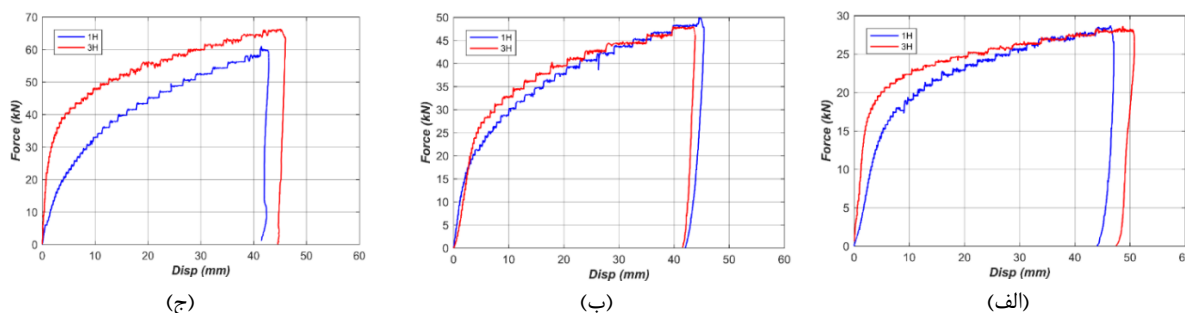
## ۵- بحث بر روی نتایج

### ۵-۱- تأثیر تعداد پره بر رفتار بار-جابجایی شمع مارپیچ در شرایط مرطوب

تأثیر تعداد پره در شرایط مرطوب در شکل ۱۱ به ازای تراکم‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این نمودارها مشخص است، شیب اولیه نمودار تند بوده و در گام‌های اولیه بارگذاری جابجایی قابل ملاحظه‌ای در شمع ایجاد نمی‌گردد. به عبارت دیگر، تا جابجایی حدود ۱۰ درصد قطر پره، شمع مارپیچ مقاومت بالایی در برابر جابجایی از خود نشان می‌دهد. این مقاومت اولیه، ناشی از قفل و بست شدگی<sup>۱۳</sup> پره‌های مارپیچ با خاک اطراف شمع می‌باشد. از طرف دیگر با مقایسه سه تراکم بررسی شده می‌توان دریافت که در این حالت تعداد پره‌های شمع، در تراکم سست و متوسط تأثیر چشمگیری نداشته و در گام‌های ابتدایی و انتهای بارگذاری رفتار شمع تک پره و سه پره تقریباً برهم منطبق می‌باشد. ولی در نمونه‌ی متراکم افزایش تعداد پره‌های مارپیچ، ظرفیت باربری شمع را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. زیرا با افزایش تراکم درگیری بین پره و خاک اطراف بیشتر شده و در نتیجه هر یک از پره‌ها به صورت جداگانه سبب افزایش ظرفیت باربری می‌گردند. با وجود اینکه در این پژوهش بارگذاری تا دستیابی به جابجایی حدود ۵۰ درصد قطر پره شمع ادامه پیدا

<sup>13</sup> Interlocking

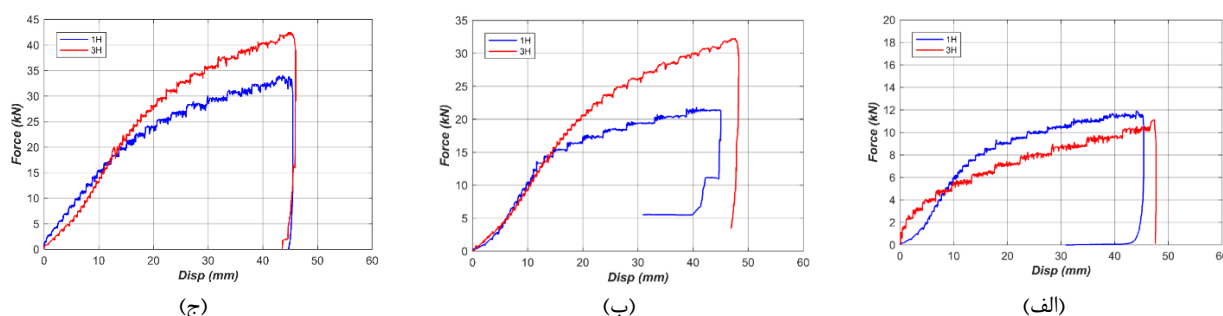
می‌کند مشاهده می‌شود شمع در در جابجایی‌های بالا ظرفیت باربری خود را از دست نداده است. این موضوع در نمونه‌ی متراکم از سایر تراکم‌ها مشهودتر می‌باشد و شمع ماریچج توان باربری بالایی از خود نشان داده است. با این وجود بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران بر روی شمع ماریچج و پیشنهادات آن‌ها، دست‌یابی به جابجایی معادل با ۱۵ درصد قطر پره‌ی شمع به عنوان معیاری برای مقایسه‌ی ظرفیت باربری شمع ماریچج در نظر گرفته شده است. با توجه به این معیار می‌توان اظهار نمود که افزایش تعداد پره‌های شمع از یک به سه عدد در نسبت فاصله‌ی برابر با ۱/۵ در شرایط مرطوب می‌تواند ظرفیت باربری شمع را تا حدود ۱۶ درصد افزایش دهد.



شکل ۱۱: تأثیر تعداد پره بر رفتار بار-جابجایی شمع‌های ماریچج برای نمونه‌ی مرطوب؛ الف) تراکم سست، ب) تراکم متوسط، ج) نمونه متراکم.

## ۲-۵- تأثیر تعداد پره بر رفتار بار-جابجایی شمع ماریچج در شرایط اشباع

تأثیر تعداد پره بر ظرفیت باربری شمع‌های ماریچج در شرایط اشباع در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، برخلاف نمونه‌ی مرطوب، در حالت اشباع، شمع ماریچج مقاومت اولیه‌ی قابل توجهی از خود نشان نداده و آب در نقش روان کننده<sup>۱۴</sup> بین ذرات ماسه و پره‌های شمع عمل نموده و سبب کاهش درگیری و اصطکاک بین آن‌ها می‌گردد. در نتیجه از همان گام‌های اولیه‌ی بارگذاری، با افزایش نیرو، جابجایی‌های ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در نمونه با تراکم متوسط و متراکم، پس از جابجایی حدود ۱۵ درصد قطر پره، درگیری خاک و پره افزایش یافته و پس از آن می‌توان افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت باربری شمع ماریچج با افزایش تعداد پره‌ها را ملاحظه نمود. لازم به ذکر است، برای نمونه با تراکم سست در شرایط اشباع، نصب شمع ماریچج سه پره دستخوردگی نمونه را افزایش داده و به همین دلیل مدلسازی فیزیکی شمع ماریچج برای بررسی اثر پره برای نمونه‌ی سست در شرایط اشباع کارایی لازم را نخواهد داشت. با توجه به پیشنهادات سایر پژوهشگران و در نظر گرفتن جابجایی ۱۵ درصد قطر پره به عنوان معیار ظرفیت باربری شمع ماریچج، با افزایش تعداد پره ظرفیت باربری شمع ماریچج در شرایط اشباع تغییری نمی‌کند و در عمل تا زمانیکه جابجایی‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش نیابد، تأثیر پره بر ظرفیت باربری شمع مشهود نمی‌باشد.

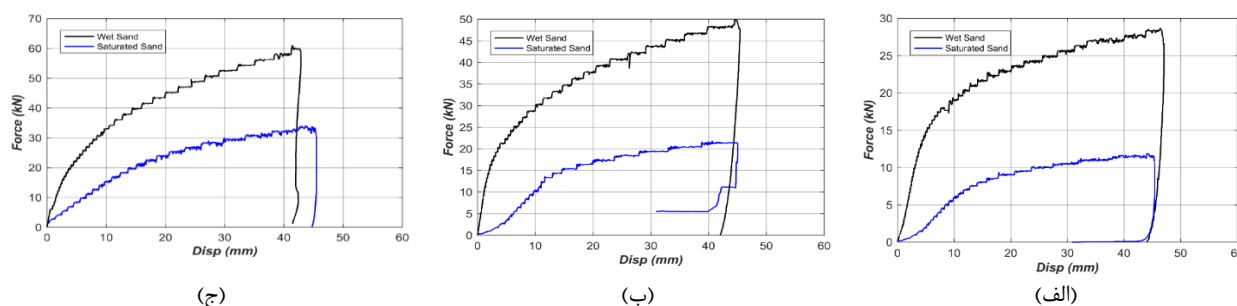


شکل ۱۲: تأثیر تعداد پره بر رفتار بار-جابجایی شمع‌های ماریچج برای نمونه‌ی اشباع؛ الف) تراکم سست، ب) تراکم متوسط، ج) نمونه متراکم.

<sup>۱۴</sup>Lubricant

## ۳-۵- تأثیر اشباع شدن نمونه بر رفتار بار-جابجایی شمع مارپیچ

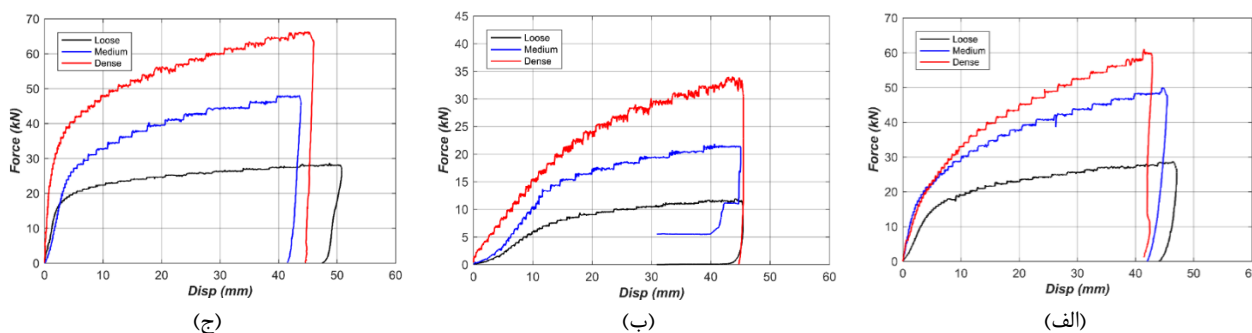
مقایسه رفتار بار-جابجایی نمونه مرطوب و اشباع در تراکم سست، متوسط و متراکم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در شرایط اشباع ظرفیت باربری شمع کاهش محسوسی پیدا می‌کند. علت این امر وجود آب در بین ذرات خاک می‌باشد که فشار آب منفذی نامیده می‌شود. با توجه به اصل تنش موثر ترزاقی زمانیکه نمونه تحت وزن خود اشباع می‌شود، تنش وارده به ذرات جامد خاک کاهش می‌یابد. از طرفی وجود سیال در بین دانه‌های جامد خاک همانند روان‌کننده اثر نموده و باعث کاهش اصطکاک بین صفحات مارپیچ و نمونه‌ی ماسه شده و در نتیجه ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. با وجود اینکه در اثر اشباع شدن، ظرفیت باربری شمع به طور کلی کاهش می‌یابد ولی در نمونه‌ی متراکم ظرفیت باربری شمع مارپیچ، نسبت به دو تراکم دیگر کاهش کمتری می‌یابد. علت این امر را می‌توان به افزایش درگیری صفحات مارپیچ با خاک اطراف شمع بدلیل تراکم بالای نمونه مربوط دانست که با وجود اینکه سیال به عنوان روان‌کننده و کاهش دهنده اصطکاک بین دانه‌های خاک و صفحات مارپیچ اثر می‌کند ولی تراکم بالای نمونه تا حدودی درگیری لازم برای بسیج شدن مقاومت پره‌های شمع را محیا می‌سازد. بدین ترتیب می‌توان بیان نمود که استفاده از شمع مارپیچ در شرایط اشباع برای خاک سست تأثیر چندانی ندارد و بهترین عملکرد شمع مارپیچ برای شرایط متراکم می‌باشد. با توجه به این نمودارها می‌توان اظهار نمود که به طور میانگین در شرایط مشابه نصب (عمق یکسان نصب) اشباع شدن نمونه سبب کاهش ۷۵ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.



شکل ۱۳: مقایسه رفتار بار-جابجایی شمع تک پره در شرایط مرطوب و اشباع؛ (الف) نمونه سست، (ب) نمونه متوسط، (ج) نمونه متراکم.

## ۴-۵- تأثیر تراکم نمونه بر رفتار بار-جابجایی شمع مارپیچ

رفتار بار-جابجایی شمع‌های تک پره و سه پره در شرایط مرطوب و اشباع به ازای تراکم‌های مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، با اضافه شدن تراکم نمونه، ظرفیت باربری شمع افزایش می‌یابد. با دقت به نمودارهای بدست آمده می‌توان بیان نمود که با افزایش تراکم، درگیری صفحات مارپیچ با خاک اطراف بیشتر شده و در نتیجه اصطکاک بیشتری در بین آن‌ها ایجاد شده و مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهند. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش تراکم اختلاف بین مقاومت اولیه‌ی شمع مارپیچ در جابجایی‌های پایین و مقاومت نهایی شمع بیشتر می‌شود. به طور میانگین در خاک مرطوب افزایش تراکم از سست به متوسط و از متوسط به متراکم به ترتیب سبب افزایش ۶۰ و ۲۳ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.



شکل ۱۴: تأثیر تراکم بر رفتار بار-جابجایی شمع مارپیچ؛ (الف) شرایط مرطوب شمع تک پره، (ب) شرایط اشباع شمع تک پره؛ (ج) شرایط مرطوب شمع سه پره.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش مدلسازی فیزیکی شمع ماریپیچ تک پره و سه پره در سه تراکم سست، متوسط و متراکم با استفاده از پنجمین دستگاه FCV ساخته شده در دنیا انجام گرفته است. این دستگاه با ابعادی بهینه، توزیع تنش خطی و قابل قبول در راستای محور دستگاه ایجاد نموده و در طراحی آن امکان اشباع نمودن نمونه برای اولین بار در دنیا فراهم آمده است. در این پژوهش برای اولین بار مدلسازی فیزیکی شمع ماریپیچ در محیط اشباع انجام گرفته و نتایج زیر حاصل شد:

۱- شمع ماریپیچ در حالت کلی ظرفیت باربری قابل قبولی تحت تنش فشاری از خود نشان داده است، به گونه‌ای که تا دست‌یابی به جابجایی حدود ۵۰ درصد قطر پره، همچنان شمع ماریپیچ تک پره و سه پره توان باربری از خود نشان داده‌اند. هرچند این ظرفیت باربری در جابجایی‌های کم بیشتر می‌باشد ولی با افزایش گام‌های بارگذاری و افزایش جابجایی نوک شمع، توان باربری شمع پابرجا می‌باشد.

۲- شمع ماریپیچ در شرایط مرطوب در سه تراکم مورد بررسی (سست، متوسط و متراکم) تا جابجایی حدوداً ۱۰ درصد قطر پره، مقاومت اولیه‌ی بالایی از خود نشان داده و جابجایی کمی در شمع ایجاد می‌گردد. ولی در شرایط اشباع، از همان گام‌های اولیه بارگذاری، با افزایش نیروی وارده جابجایی ایجاد شده در شمع محسوس می‌باشد.

۳- با افزایش تراکم، قفل و بست بین پره‌ها (ها) با خاک اطراف افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت باربری نهایی شمع افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تراکم نمونه، اختلاف بین مقاومت شمع در گام‌های ابتدایی (در جابجایی‌های کمتر از ۱۵ درصد قطر پره) با مقاومت نهایی شمع بیشتر می‌شود.

۴- افزایش تعداد پره از یک طرف دست‌خوردگی نمونه در حین نصب شمع را افزایش داده و از طرف دیگر سطح درگیری شمع با خاک اطراف را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده در جابجایی حدود ۱۵ درصد قطر پره، در نمونه‌های مرطوب تا افزایش ۱۶ درصدی ظرفیت باربری با افزایش تعداد پره مشاهده شده است.

۵- در حالت اشباع ظرفیت باربری شمع تک پره و سه پره تفاوت چندانی با هم ندارد. علت این امر حضور آب به عنوان روان‌کننده در نمونه می‌باشد که اصطکاک بین خاک و پره را کاهش می‌دهد. برای بسیج شدن مقاومت هر پره به جابجایی اولیه‌ای نیاز می‌باشد تا مقاومت اصطکاک هر پره بسیج شده و ظرفیت باربری شمع ماریپیچ را افزایش دهد. با افزایش میزان جابجایی شمع، تأثیر پره در جابجایی‌های بالا برای نمونه با تراکم متوسط و متراکم مشاهده می‌شود ولی در نمونه‌ی سست به دلیل دست‌خوردگی بالای نمونه در شمع سه پره، تأثیر چندانی در ظرفیت باربری حتی در جابجایی‌های بالا ملاحظه نمی‌گردد.

۶- از آنجاییکه اشباع شدن نمونه از یک سو سبب کاهش تنش مؤثر و از سوی دیگر، به واسطه نقش روان‌کنندگی آب سبب کاهش اصطکاک بین شمع و خاک اطراف می‌گردد اشباع شدن نمونه، ظرفیت باربری شمع ماریپیچ را تا حداکثر ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. در این بین نمونه‌ی متراکم با کاهش حدوداً ۵۰ درصدی ظرفیت باربری، کمترین کاهش ظرفیت باربری را خواهد داشت.

۷- به طور میانگین در خاک مرطوب افزایش تراکم از سست به متوسط و از متوسط به متراکم به ترتیب سبب افزایش ۶۰ و ۲۳ درصدی در ظرفیت باربری می‌گردد.

۸- مدلسازی فیزیکی شمع سه پره در ماسه‌ی متراکم چه در حالت مرطوب چه در حالت اشباع ظرفیت باربری بالایی از خود نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان اظهار نمود که در بین آزمایش‌های انجام شده بهترین عملکرد مربوط به مدلسازی فیزیکی شمع سه پره در نمونه‌ی متراکم می‌باشد و متعاقباً می‌توان بیان نمود که نتایج مدلسازی فیزیکی شمع ماریپیچ در شرایط اشباع برای نمونه‌ی سست قابل اعتماد نمی‌باشد.



## مراجع

- [1] Zare, M., & Eslami, A. (2014). Study of deep foundation performances by frustum confining vessel (FCV). *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 271-280.
- [2] Zarrabi, M., & Eslami, A. (2016). Behavior of piles under different installation effects by physical modelling. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 04016014.
- [3] Canadian Geotechnical Society. (2006). *Canadian foundation engineering manual*, 4th Ed., Vancouver, BC, Canada.
- [4] Basu, P., & Prezzi, M. (2009). Design and applications of drilled displacement (screw) piles.
- [5] Khazaei, J., & Eslami, A. (2016). Geotechnical behavior of helical piles via physical modeling by Frustum Confining Vessel (FCV). *International Journal of Geography and Geology*, 5(9), 167-181.
- [6] Fateh, A. M. A., Eslami, A., & Fahimifar, A. (2018). A study of the axial load behaviour of helical piles in sand by frustum confining vessel. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(4), 175-190.
- [7] Perko, H. A. (2009). *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons.
- [8] Khazaie, J., & Eslami, A. (2016). Behavior of helical piles-as a geoenvironmental choice-by frustum confining vessel (FCV). *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 10(31).
- [9] Sakr, M. (2011). Installation and performance characteristics of high capacity helical piles in cohesionless soils. *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 5(1), 39-57.
- [10] Di Bernardo, G. (2012). *Helical pile Deck foundation*. New Jersey Deck Boulder, USA.
- [11] Sprince, A., & Pakrastinsh, L. (2010). Helical pile behaviour and load transfer mechanism in different soils. *Modern Building Materials, Structures and Techniques. Proceedings of the International Conference*. (Vol. 10, p. 1174). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- [12] Merifield, R. S. (2011). Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 137(7), 704-716.
- [13] Karimi, A. H., & Eslami, A. (2018). Physical modelling for pile performance combined with ground improvement using frustum confining vessel. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(3), 162-174.
- [14] Sedran, G. (1999). *Experimental and analytical study of a frustum confining vessel*. Doctoral dissertation. McMaster University, Civil Engineering Department.
- [15] Azizi, F. (1999). *Applied analyses in geotechnics*. CRC Press.
- [16] Mortazavi Bak, H., Halabian, A., & Hashemolhosseini, S. (2020). Optimization of frustum confining vessels using different boundary and interface conditions. *Int. J. Phys. Modell. Geotech.* <https://doi.org/10.1680/jphmg.19>.
- [17] Baziar, M. H., Ghorbani, A., & Katzenbach, R. (2009). Small-scale model test and three-dimensional analysis of pile-raft foundation on medium-dense sand.
- [18] Heib, M. A., Emeriault, F., Caudron, M., Nghiem, L., & Hor, B. (2013). Large-scale soil-structure physical model (1 g)-assessment of structure damages. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 13(4), 138-152.
- [19] Ullah, M. S., Yamamoto, H., Goit, C. S., & Saitoh, M. (2018). On the verification of superposition method of kinematic interaction and inertial interaction in dynamic response analysis of soil-pile-structure systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 522-533.
- [20] Houlisby, G. T., & Hitchman, R. (1988). Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand. *Géotechnique*, 38(1), 39-44.
- [21] Wei, J., & El Naggar, M. H. (1998). Experimental study of axial behaviour of tapered piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(4), 641-654.
- [22] Lee, J., Paik, K., Kim, D., & Park, D. (2012). Estimation of ultimate lateral load capacity of piles in sands using calibration chamber tests. *Geotechnical Testing Journal*, 35(4), 563-574.
- [23] Zhang, L., McVay, M. C., & Lai, P. W. (1999). Centrifuge modelling of laterally loaded single battered piles in sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), 1074-1084.
- [24] Nicola, A. D., & Randolph, M. F. (1999). Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads. *Géotechnique*, 49(3), 295-318.
- [25] Naggar, M. H. E., & Sakr, M. (2000). Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1295-1308.
- [26] Lam, S. Y., Ng, C. W., Leung, C. F., & Chan, S. H. (2009). Centrifuge and numerical modeling of axial load effects on piles in consolidating ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(1), 10-24.
- [27] Horvath, R. G. (1995). Influence of loading rate on the capacity of a model pile in clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(2), 364-368.
- [28] Horvath, R. G., & Stolle, D. (1996). Frustum confining vessel for testing model piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 499-504.
- [29] Mullins, G., Dapp, S., Frederick, E., & Wagner, R. (2001). POST GROUTING DRILLED SHAFT TIPS. PHASE I.

- [30] Esmailzade, M., Eslami, A., Nabizadeh, A., & Aflaki, E. (2022). Effect of cone diameter on determination of penetration resistance using a FCV. *International Journal of Civil Engineering*, 20(2), 223-236.
- [31] Bak, H. M., Halabian, A. M., Hashemolhosseini, H., & Rowshanzamir, M. (2021). Axial response and material efficiency of tapered helical piles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 176-187.
- [32] Bak, H. M., Halabian, A. M., Hashemolhosseini, H., & Rowshanzamir, M. (2021). Axial response and material efficiency of tapered helical piles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1), 176-187.
- [33] Jassim, A., Ganjian, N., & Eslami, A. (2022). Design and fabrication of frustum confining vessel apparatus for model pile testing in saturated soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5), 1-11.
- [34] ASTM, D. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils. D422-63.
- [35] ASTM, D. (2010). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. D854.
- [36] ASTM, D. (2000). Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. D4253.
- [37] ASTM, D. (2000). Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. D4254.
- [38] ASTM, D. (2000). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. D7181-20.
- [39] ASTM, D. (2010). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. D3080-04.
- [40] Ladd, R. S. (1978). Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1(1), 16-23.
- [41] ASTM, D. (2010). Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. D1143M-07.