

Investigation of Load-Displacement Behavior of Helical Screw Piles in the All-Directional Confining Vessel Apparatus (FCV-AUT) and its Generalization to Large-Scale Screw Piles.

Mohsen Ahmadnejhad¹, Morteza Naghipour^{2*}, Amir Mansour Askari Fateh³

1- PhD Student, Department of Civil Engineering. Babol University of Technology, Babol, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering. Babol University of Technology, Babol, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Babol University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

In contemporary times, considering the expansion of urbanization and the construction of sophisticated engineering structures, special foundation systems have garnered attention. One of the crucial and practical types of foundations is helical piles, including helical screw piles. Owing to the commendable performance of these piles, their application has gained significance in various geotechnical engineering contexts. The current research encompasses a case study on utilizing these piles in the city of Babolsar. To better understand the behavior of these piles in different soils, various scenarios were experimentally evaluated in the sandy soil of Babolsar, and the obtained results were subject to interpretation and analysis. Key parameters in these investigations include the effect of helix diameter, helix spacing ratio (S/D), sand density, and repeatability. The results indicate that increasing helix diameter, sand density, and S/D ratio will enhance the load-bearing capacity. This relationship holds in reverse as well. Moreover, good repeatability was observed in the results. Considering the outcomes of this study, the utilization of these piles proves to be significantly valuable in improving soil conditions. In addition to providing adequate resistance, it offers considerable economic benefits, making it advisable for implementation in construction projects. Furthermore, the results obtained from the FCV device, using scaling theory to extrapolate to the results of large-scale helical piles executed in the field, demonstrate good concordance.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 December 2023

Revise Date: 31 January 2024

Accept Date: 18 February 2024

Keywords:

*Helical Screw Piles Physical Modeling
All-Directional Confining Vessel Apparatus
Babolsar Sand
Scaling theory*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.427802.3286>

*Corresponding author: Morteza Naghipour.
Email address: m-naghi@nit.ac.ir

بررسی رفتار بار-جابجایی شمع‌های پیچشی پره‌ای در دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV-AUT) و تعمیم آن به شمع‌های بزرگ مقیاس

محسن احمدنژاد^۱، مرتضی نقی پور^{۲*}، امیرمنصور عسکری فاتح^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۳- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شمال آمل، ایران

چکیده

امروزه با توجه به گسترش شهرنشینی و ساخت سازه‌های مهندسی و بلند مرتبه استفاده از پی‌های خاص مورد توجه قرار گرفته است. یکی از انواع پی‌های مهم و کاربردی شمع‌های پیچشی و همچنین شمع‌های پیچشی پره‌ای هستند. با توجه به عملکرد مناسب این شمع‌ها، استفاده از این نوع پی در کاربردهای مختلفی از مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است. تحقیق حاضر در بر دارنده یک مطالعه موردی در استفاده از این شمع‌ها در شهر بابلسر است. به منظور درک بهتر رفتار این شمع‌ها در خاک‌های مختلف، چند سناریو مختلف در ماسه شهر بابلسر مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت و نتایج بدست آمده مورد تفسیر و تحلیل قرار گرفت. از جمله پارامترهای مهم در این بررسی‌ها: اثر قطر پره‌ها، نسبت فاصله پره‌ها (S/D)، دانسیته ماسه و تکرارپذیری می باشد. نتایج حاصل شده حاکی از آن است که افزایش قطر پره‌ها، افزایش دانسیته خاک و همچنین افزایش S/D ، ظرفیت باربری را افزایش خواهد داد. عکس این رابطه نیز صادق بوده است. همچنین تکرارپذیری خوبی در نتایج دیده شد. با توجه به نتایج این تحقیق استفاده از این نوع شمع در بهبود شرایط خاک دارای ارزش قابل توجهی می‌باشد و ضمن تامین مقاومت مناسب، صرفه اقتصادی قابل توجهی را در بر خواهد داشت و استفاده از آن در پروژه‌های اجرایی توصیه می‌شود. همچنین در انتها نتایج بدست آمده از دستگاه FCV با استفاده از تئوری مقیاس به نتایج شمع‌های بزرگ مقیاس اجرا شده در میدان، تعمیم داده شده است که نتایج از همخوانی خوبی برخوردار بوده است.

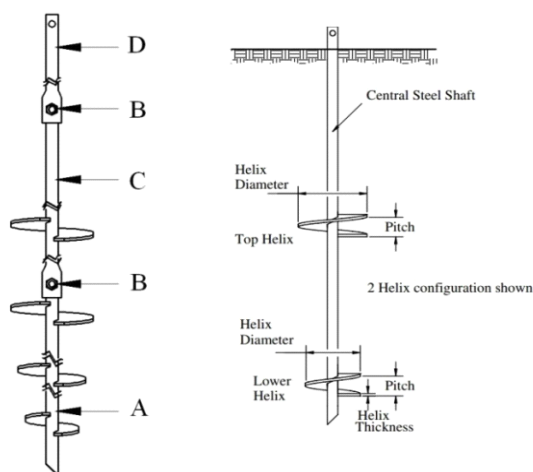
کلمات کلیدی: شمع‌های پیچشی پره‌ای، مدل سازی فیزیکی، دستگاه فشار همه جانبه مخروطی، ماسه بابلسر، تئوری مقیاس

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|------------------------------------|---|--------------|---------------|------------------------------------|------------|------------|
| doi: | https://doi.org/10.22065/jsce.2024.427802.3286 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2024.427802.3286 | ۱۴۰۳/۰۷/۳۱ | ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ | ۱۴۰۲/۱۱/۲۹ | ۱۴۰۲/۱۱/۱۱ | ۱۴۰۲/۰۹/۱۹ |
| مرتضی نقی پور m-naghi@nit.ac.ir | | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | | |

۱- مقدمه

یکی از روش‌های مؤثر در تقویت ظرفیت باربری پی‌ها اجرای آن‌ها بصورت عمیق می‌باشد، چراکه خاک بالقوه با افزایش عمق بدلیل افزایش تنش‌های محصورکننده، تنش‌های مؤثر سربار و پیش فشردگی، از ظرفیت باربری بیش‌تری می‌تواند برخوردار باشد [۱، ۲]. از دید مهندس ژئوتکنیک هنگامی که لایه‌های سطحی خاک به لحاظ توان باربری و شکل‌پذیری برای اجرای شالوده سطحی مناسب نباشد یکی از تکنیک‌های مؤثر جهت بهبود شرایط، اجرای پی‌های عمیق (شمع‌ها) می‌باشد [۳].

امروزه شمع‌های پیچشی پره‌ای یکی از انواع پی‌های عمیقی است که هدف از اجرای آن تأمین نیروهای مقاوم کششی و فشاری است. این شمع‌ها شامل یک محور مرکزی با مقطع مربع یا استوانه‌ای توپر و یا توخالی است که بر روی آن تعدادی صفحات پیچشی فولادی به شکل حلزونی با دقت بالا و طول پیچ مشخص جوش می‌گردد [۴، ۵]. در شکل ۱ نمایی از این نوع شمع به همراه متعلقات آن نشان داده شده است. میچل برای اولین بار از این نوع شمع در یکی از سواحل ناپایدار در نزدیکی دهانه ورودی رودخانه تیمز لندن جهت اجرای پی یک دکل فانوس دریایی استفاده نمود [۴]. از آن زمان تاکنون پیشرفتهای زیادی در ساخت انواع مختلف این نوع شمع صورت گرفته و از سال ۱۹۶۰ میلادی با ساخت موتورهای هیدرولیکی پیچشی که امکان رانش این نوع شمع را به داخل خاک تسهیل نموده شتاب بیشتری گرفته است، بگونه‌ای که امروزه از این سیستم جهت تحمل بارهای فشاری در پی ساختمان‌ها و همچنین تحمل نیروهای کششی و مهارى به منظور تقویت انواع شالوده‌ها استفاده می‌شود. طول این شمع با نصب میله‌های اضافی به همراه پره مازاد و یا فاقد پره پیچشی، افزایش می‌یابد. نحوه نصب آن‌ها در خاک با اعمال لنگر پیچشی به میله مرکزی همزمان با اعمال فشار محوری توسط یک موتور پیچشی و بازوی نگهدارنده صورت می‌پذیرد.



شکل ۱: نمایی از متعلقات شمع‌های پیچشی پره‌ای؛ (A) نوک هادی حاوی چند پره (B) گره اتصال (C) میله مضاعف به همراه یک پره اضافی (D) میله مضاعف جهت ازدیاد طول میله فاقد پره [۴]

استفاده از شمع‌های پیچشی به دلیل ظرفیت باربری کششی و فشاری بالا، سرعت بالای اجرا، اجرا در محیط با دسترسی کم، راحتی اجرا در زمین‌های باتلاقی و منجمد و هزینه مؤثر پایین به شدت گسترش پیدا کرده است [۶، ۷]. اما مشکل اصلی این شمع‌ها ایجاد دستخوردگی در خاک اطراف شمع در زمان اجرا توسط پره‌ها باشد که با استفاده از روش‌های پس تزریق میتوان این مشکل را نیز تا حدودی بر طرف کرد [۸-۱۰].

بیشتر تحقیقات نشان می‌دهد برای نسبت فاصله پره به قطر پره بیش از ۳، عملکرد این شمع‌ها به صورت منفرد بوده است [۷، ۱۱]. مطالعات انجام شده توسط حسن عباس در سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد با افزایش مقادیر عمق نفوذ، تراکم نسبی، قطر پره و تعداد پره، مقدار نیروی محوری شمع‌های پیچشی پره‌ای افزایش می‌یابد. با افزایش تراکم نسبی خاک ماسه‌ای از حالت سست به حالت متراکم، باربری محوری شمع‌ها در بازه‌های ۲۲-۴۰٪ و ۴۱-۷۰٪ تغییر می‌کند [۱۱]. ظرفیت باربری محوری شمع‌های پیچشی پره‌ای با فرض احتمال

دو نوع گسیختگی از نوع منفرد^۱ و گسیختگی سیلندری^۲ محاسبه می‌گردند [۱۲]. در روش اول فرض می‌شود گسیختگی در زیر هر پره به صورت مجزا صورت گرفته و ظرفیت باربری کل از مجموع مقاومت قابل تحمل پرها به دست می‌آید اما در روش گسیختگی سیلندری فرض می‌شود پرها و خاک بین آن‌ها به صورت یک ستون عمل می‌کنند [۱۲]. در این حالت ظرفیت باربری شمع برابر با مجموع مقاومت نوک و مقاومت جداره ستون تشکیل شده می‌باشد. بسته به نوع خاک و فاصله نسبی پرها (نسبت فاصله پرها به قطر متوسط پرها (S/D)) یکی از دو نوع گسیختگی سیلندری یا مجزا رخ خواهد داد [۱۳، ۱۴].

با توجه به پیچیدگی رفتار خاک، تعیین رفتار شمع‌ها یکی از چالش‌های ضروری و مهم در ژئوتکنیک می‌باشد. اما در شمع‌های پیچشی پره‌ای با توجه به هندسه خاص و دستخوردگی خاک اطراف، مطالعه دقیق تر رفتار آن الزامی است. به طور کلی روش‌های مطالعه شمع‌ها را می‌توان به چهار روش، شامل: روش‌های تحلیلی، عددی، میدانی و آزمایشگاهی تقسیم‌بندی نمود [۱۵]. در این میان روش‌های میدانی قابل اعتمادتر و دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها هستند [۱۶، ۱۷]. روش‌های تحلیلی و عددی به دلیل پیچیدگی رفتار خاک‌ها نیاز به ساده سازی زیادی داشته که احتمال افزایش خطا در نتایج را به دنبال دارد. مطالعات میدانی اگرچه پاسخ‌های مناسبی تری را ارائه می‌دهند، لیکن باعث افزایش هزینه و تطویل پروژه می‌گردد. مدل‌سازی فیزیکی روشی کم‌هزینه جهت بررسی عملکرد انواع پی‌ها و آزمایش‌های درجا بوده و می‌تواند به عنوان یک مکمل مناسب برای روش‌هایی عددی بکار گرفته شود. در این مدل‌سازی می‌توان به راحتی پارامترهای حاکم بر اندرکنش شمع و خاک را با انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های کاملاً مشابه، به صورت ایزوله مورد بررسی قرار داد [۱۸]. مدل سازی فیزیکی در ژئوتکنیک به دو دسته مدل سازی در سطح تنش‌های پایین (۱g) و مدل سازی در سطح تنش‌های بالا، محفظه کالیبراسیون^۳، دستگاه گریز از مرکز^۴، محفظه فشار همه جانبه مخروطی^۵ تقسیم می‌گردد. دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV) ترکیبی از دو دستگاه CC و سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بوده و توزیع تنش در این دستگاه مشابه میدان میباشد که این توزیع تنش به سبب شکل هندسی دستگاه FCV و فشار اعمال شده از کف سیستم به وجود می‌آید. با توجه به اینکه قسمت بالایی دستگاه به طور مستقیم با هوای آزاد در ارتباط است، بنابراین دارای تنش برابر صفر بوده و با توجه به شکل مخروطی و نحوه طراحی آن، گرادیان تنش به صورت خطی با پیشروی به کف دستگاه افزایش می‌یابد.

در این پژوهش رفتار بار-جابجایی شمع‌های پیچشی پره‌های با استفاده از دستگاه فشار همه جانبه مخروطی در دو بارگذاری کششی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش شامل قطر پره، نسبت فاصله پره (S/D) و دانسیته ماسه بوده است. در آخر نیز جهت صحت سنجی نتایج و اطمینان از درستی نتایج و عملکرد دستگاه فشار همه جانبه مخروطی نتایج آزمایش‌ها با استفاده از روابط مقیاس به نتایج مطالعات میدانی تعمیم داده شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی و دستگاه FCV-AUT

۲-۱ FCV-AUT

ایده اولیه ساخت این دستگاه توسط شرکت فونداسیون برمینگهام با همکاری دانشگاه مک‌مستر کانادا ارائه شد [۱۹]. این دستگاه ترکیبی از دستگاه سانتریفیوژ و دستگاه محفظه تحکیم می‌باشد. با اعمال فشار کف در قاعده مخروط دستگاه FCV قسمت بالای دستگاه مستقیماً به هوای آزاد ارتباط داشته که همین امر سبب به وجود آمدن شرایط تنش صفر در بالای نمونه می‌شود درحالی که

¹ Individual bearing

² Cylindrical shear method

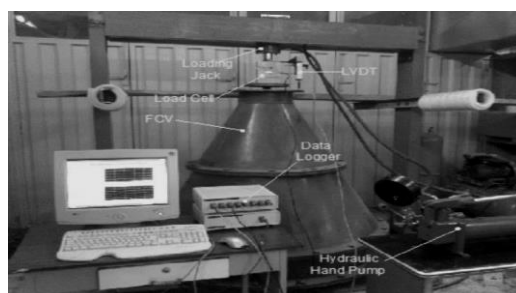
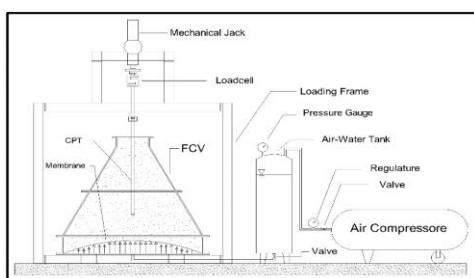
³ Calibration Chamber

⁴ Geotechnical centrifuge

⁵ Frustum Confining Vessel (FCV)

گرادیان تنش به صورت تقریباً خطی به سمت کف دستگاه افزایش می‌یابد بگونه‌ای که در هر تراز تنش متناسب با میزان فشار اعمالی به کف ایجاد خواهد شد [۲۰، ۲۱].

در سال ۲۰۱۲ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی شروع به ساخت و ارزیابی عملکرد شد که از نظر ابعادی بزرگ‌ترین نوع این دستگاه در آن زمان بوده است. بزرگ بودن این دستگاه امکان مدل کردن شمع‌ها با ابعاد بزرگ‌تر را فراهم می‌نماید و همچنین باعث می‌شود خطای ناشی از شرایط مرزی در آن کاهش پیدا کند [۲۲]. برای اعمال فشار کف دستگاه از غشای لاستیکی و فشار هیدرولیک استفاده شده است. به طوری که در ابتدا هوای فشرده شده کمپرسور وارد یک مخزن هوا-آب گردیده و آب را با فشار بالا به فضای بین غشای لاستیکی و صفحه فلزی هدایت نموده در نتیجه، فشار به کف نمونه اعمال می‌گردد [۱۸]. نمای کلی از دستگاه، سیستم بارگذاری و سیستم ثبت و قرائت داده‌ها در شکل ۲ آورده شده است.

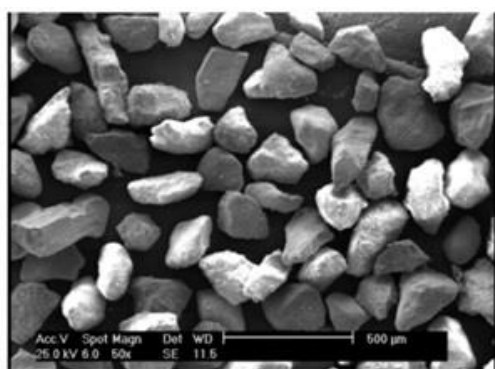


شکل ۲ تصویر شماتیک و واقعی از دستگاه FCV به همراه تجهیزات بارگذاری

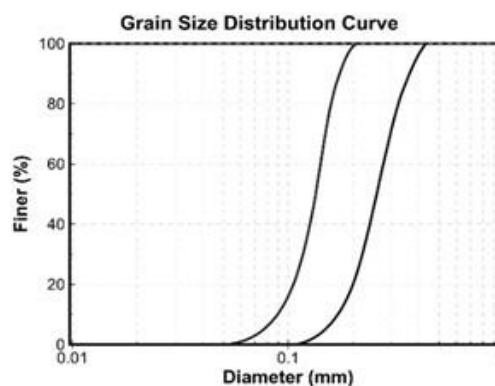
۲-۲ مشخصات ماسه و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

یکی از کاربردهای اصلی شمع‌های پیچشی پره‌ای در محیط‌های ساحلی و دریایی می‌باشد، بنابراین خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها، ماسه بابلسر که نوعی ماسه ساحلی می‌باشد انتخاب شده است. نتایج آزمایش دانه بندی این خاک در شکل ۳-الف نشان داده شده است. بر اساس روش طبقه‌بندی UNIFIED این خاک در طبقه بندی ماسه ای از نوع (SP) جای می‌گیرد. تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

جهت شناسایی خصوصیات این خاک، آزمایش‌های مختلفی از جمله توده ویژه، تراکم، تعیین دانسیته حداقل و حداکثر مطابق استانداردهای ASTM انجام شده است. مشخصات خاک مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳: ماسه بابلسر الف) نمودار دانه‌بندی ب) عکس SEM ذرات ماسه.

جدول ۱: مشخصات ماسه بابلسر.

| پارامتر | مقدار |
|--------------------------|-------|
| $D_{50}(mm)$ | ۰/۱۸ |
| e_{max} | ۰/۸۷۶ |
| e_{min} | ۰/۶۳۷ |
| $\gamma_{d,max}(kN/m^3)$ | ۱۷/۰ |
| $\gamma_{d,min}(kN/m^3)$ | ۱۴/۸۲ |
| G_s | ۲/۷۸ |
| C_u | ۱/۲۲ |
| C_c | ۱/۶۷ |
| ω_{opt} | ۱۱ |

نمونه‌های ساخته شده در حالت‌های دانسیته پایین ($Dr=20-25$)، متوسط ($Dr=45-50\%$) و دانسیته بالا ($Dr=65-70\%$) آماده سازی شده اند. کلیه نمونه‌های موجود با استفاده از روش کوبش مرطوب ساخته شده است، (مقدار آب ۴٪ وزنی ماسه خشک) کرده و ماسه را به خوبی مخروط کرده تا خاک یکنواخت مرطوب شود. برای ایجاد دانسیته‌های مورد نظر مقدار خاک محاسبه شده برای لایه‌های ۵ سانتی‌متر وزن کرده و آن را در داخل دستگاه FCV-AUT ریخته سپس با کمک کوبه چوبه آن کوبیده تا به ارتفاع ۵ سانتی‌متر برسد و در حین کوبیدن با کمک متر ارتفاع را در چهار گوشه اندازه گرفته تا خاک به صورت یکنواخت و همگن در کل نقاط متراکم شود. حال لایه بعدی را ریخته و کوبش را ادامه داده تا سطح خاک در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر قرار گیرد و این عمل را تا تراز ۵۰ سانتی‌متر ادامه داده سپس قسمت بالایی دستگاه را با کمک جرثقیل دستی روی نیمه پایینی دستگاه قرار داده و دو قسمت را با کمک پیچ و مهره به هم متصل کرده و عمل خاک ریزی و کوبش را تا تراز ۱۰۰ سانتی‌متر و بالای دستگاه ادامه داده می‌شود. بخشی از نمونه سازی در شکل ۴ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴: نمونه سازی در دستگاه مدلسازی فیزیکی (الف) کوبه ها، (ب) کوبیدن خاک داخل قالب.

به منظور صحت سنجی تراکم نهایی خاک درون دستگاه FCV-AUT، علاوه بر روش مذکور، از روش دیگری نیز برای صحت-سنجی تراکم خاک استفاده شده است. در این روش از نمونه گیری از لایه های مختلف خاک توسط یک نمونه گیر کوچک استفاده شده است. این نمونه گیر شامل یک لوله با قطر ۴۹ میلیمتر و طول ۱۳۳ میلیمتر است. با داشتن حجم مشخص این نمونه گیر و وزن خاک داخل آن، وزن حجمی قابل محاسبه می باشد. یکسان بودن اعداد وزن حجمی هر یک از نمونه ها در هر آزمایش، باعث اطمینان از روند یکنواخت بودن نمونه در دستگاه است.

۲-۳ شمع پیچشی پره ای مورد مطالعه و نحوه اجرا

به منظور ساخت شمع های مورد مطالعه در این پژوهش از فولاد استفاده شده است که منطبق با شمع های اجرایی در میدان است. در طراحی و ساخت این نوع شمع ها به منظور حصول بیشترین مقاومت باید دقت داشت تا کمترین میزان دستخوردگی در خاک اطراف ایجاد شود. همچنین مقدار گام کلیه پره های یکسان است. در این پژوهش به مطالعه موردی شمع های پیچشی پره ای دارای دو پره با قطر پره و نسبت فاصله پره (S/D) متفاوت پرداخته شده که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات آزمایش‌ها.

| نام شمع | عمق اجرا (mm) | قطر میله مرکزی (mm) | قطر پره (mm) | تعداد پره | ضخامت پره (mm) | گام پره (mm) | نسبت S/D | نوع بارگذاری | دانشیته نسبی |
|----------|---------------|---------------------|--------------|-----------|----------------|--------------|----------|---------------|---------------------|
| HP64-3 | ۷۵۰ | ۳۲ | ۶۴ | ۲ | ۴ | ۲۰ | ۳ | فشاری کششی | سست متوسط سخت |
| HP70-3 | ۷۵۰ | ۳۲ | ۷۰ | ۲ | ۴ | ۲۰ | ۳ | فشاری کششی | سست متوسط |
| HP90-1/5 | ۷۵۰ | ۳۲ | ۹۰ | ۲ | ۴ | ۲۰ | ۱/۵ | فشاری کششی | سست متوسط |
| HP90-3 | ۷۵۰ | ۳۲ | ۹۰ | ۲ | ۴ | ۲۰ | ۳ | فشاری کششی | سست متوسط |
| HP90-4 | ۷۵۰ | ۳۲ | ۹۰ | ۲ | ۴ | ۲۰ | ۴ | فشاری کششی | سست متوسط سخت |

در اجرای این نوع شمع‌ها بر خلاف شمع‌های متعارف موجود علاوه بر نیروی محوری نیاز به اعمال گشتاور پیچشی است. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اعمال نیروی محوری و گشتاور پیچشی حین اجرای آزمایش توسط جک صورت می‌گیرد. شمع مورد آزمایش با استفاده از یک شفت رابط به دستگاه متصل شده و به کمک جک موجود ارتفاع تنظیم شده تا قسمت نوک شمع در تماس با خاک قرار گیرد. قبل از اجرای شمع و استقرار آن در تراز مورد نظر ابتدا دستگاه دیتالاگر را روشن و کابل‌های مربوط متصل شده و اطلاعات ثبت می‌شود. لازم است در ابتدا قبل از فرایند نفوذ از یک چک اولیه برای اطمینان از عملکرد درست هر یک از سنسورها و ابزار دقیق اطمینان حاصل شود. درحین انجام فرایند نفوذ مقدار جابجایی و گشتاور نصب به صورت پیوسته در بازه‌های زمانی ۵ ثانیه قرائت و ثبت می‌شود.



شکل ۵: دستگاه به منظور اجرای شمع در تحقیق.

در این تحقیق برای بارگذاری شمع‌ها از روش بارگذاری سریع استفاده شده است. در ابتدا با توجه به تجربیات و نتایج مطالعات انجام شده در آزمایشگاه مقدار ظرفیت باربری شمع‌ها تا تقریب خوبی پیش‌بینی شده است. همچنین برای اطمینان از درستی پیش‌بینی انجام شده با استفاده از نتایج گشتاور پیچشی حین اجرا، مقدار پیش‌بینی شده مجدداً چک شده است. بار پیش‌بینی شده به بیست قسمت تقسیم و در هر مرحله از بارگذاری یک پله از بار بر سر شمع اعمال و مقدار بار وارده توسط لودسل و جابجایی سر شمع توسط LVDT ثبت شده است (شکل ۶).



(ب)



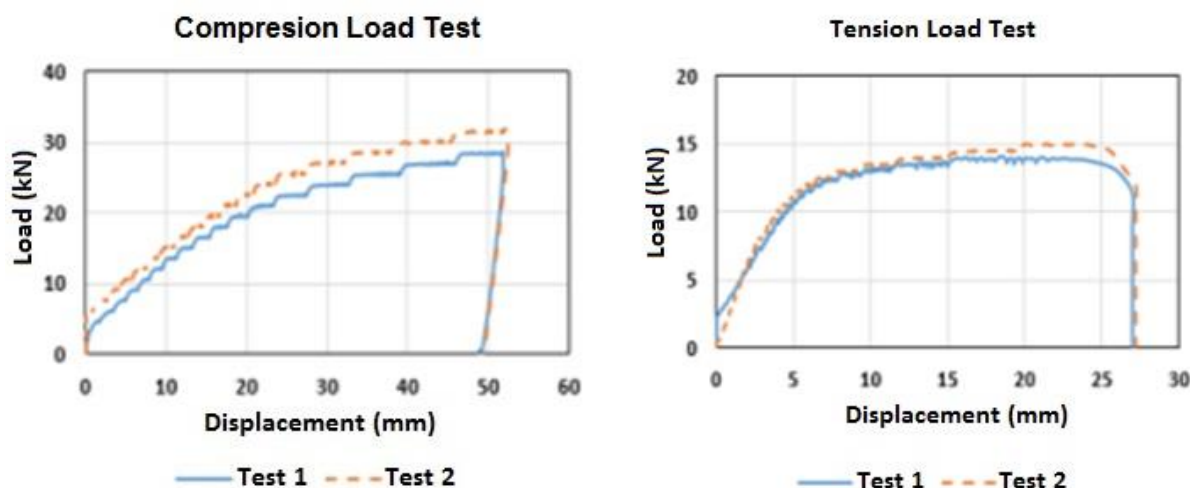
(الف)

شکل ۶: آزمایش بارگذاری فشاری و کششی بر روی شمع‌های پیچشی پره‌ای در دستگاه FCV_AUT آلف (بارگذاری فشاری ب) بارگذاری کششی

۳- ارزیابی نتایج آزمایشهای انجام شده

۳-۱- بررسی تکرارپذیری

برای اطمینان از صحت نتایج آزمایشات انجام شده در کارهای آزمایشگاهی نیاز به انجام تست‌های تکرارپذیری و صحت‌سنجی می‌باشد. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش‌های تکرارپذیری در این تحقیق به صورت قابل قبولی مشابه هم بوده است و نتایج دارای تکرارپذیری مناسبی می‌باشند. البته تفاوت اندکی در نتایج وجود دارد که این مقدار تفاوت در نتایج می‌تواند به دلیل تفاوت در ساخت نمونه یا خطا در تنظیم فشار کف باشد.



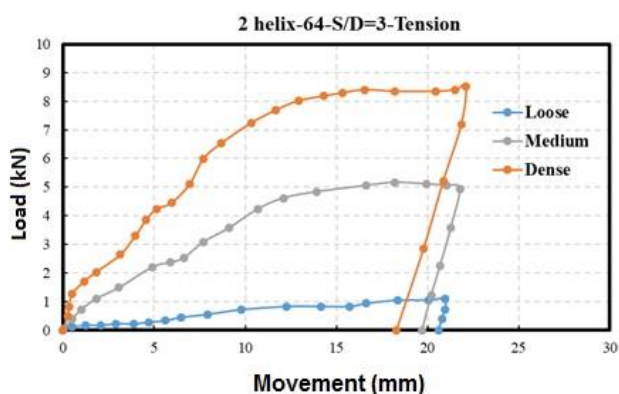
(ب)

(الف)

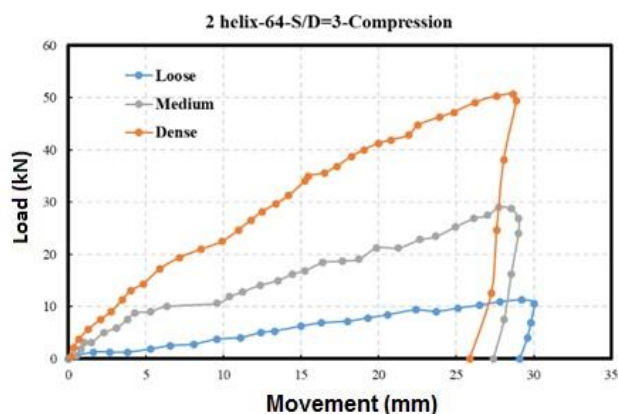
شکل ۷: تست‌های تکرارپذیری در آزمایش‌های کششی و فشاری (الف) بارگذاری فشاری (ب) بارگذاری کششی

۳-۲- بررسی اثر دانسیته

با توجه به این که در شمع‌های پیچشی پره‌ای بخش اعظمی از بار توسط پره‌ها حمل می‌شود و همچنین با افزایش دانسیته نسبی به تبع آن افزایش اندرکنش بین ذرات ماسه و زاویه اصطکاک داخلی، ابعاد گوه‌های گسیختگی افزایش پیدا کرده، مقاومت و ظرفیت باربری شمع افزایش قابل توجهی خواهد داشت. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۶۴ میلی‌متر برای S/D برابر ۳ و شمع دو پره با قطر پره ۹۰ میلی‌متر و S/D برابر ۴ در آزمایش‌های کششی و فشاری در سه دانسیته سست، متوسط و متراکم نشان داده شده است. با افزایش دانسیته نسبی مقاومت فشاری و کششی خاک افزایش پیدا کرده است به طوری که در بارگذاری فشاری نسبت باربری در دو حالت اجرا شده در ماسه متراکم و متوسط به سست به ترتیب ۵ و ۳ برابر شده و در آزمایش‌های کششی این نسبت در حدود ۱۰ تا ۵ برابر بوده است. می‌توان نتیجه گرفت، افزایش دانسیته به طور قابل توجهی باعث افزایش ظرفیت باربری گردیده که این افزایش در بارگذاری کششی محسوس‌تر بوده است.

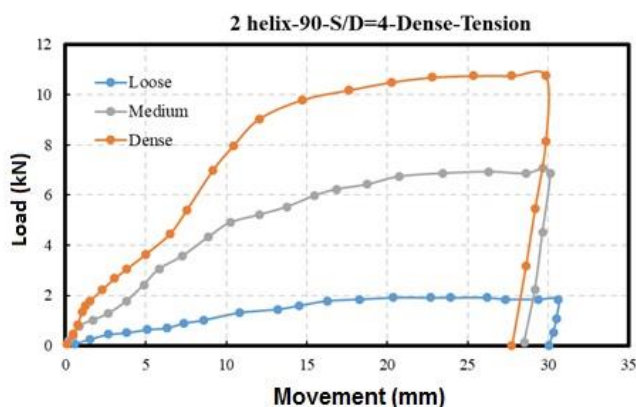


(ب)

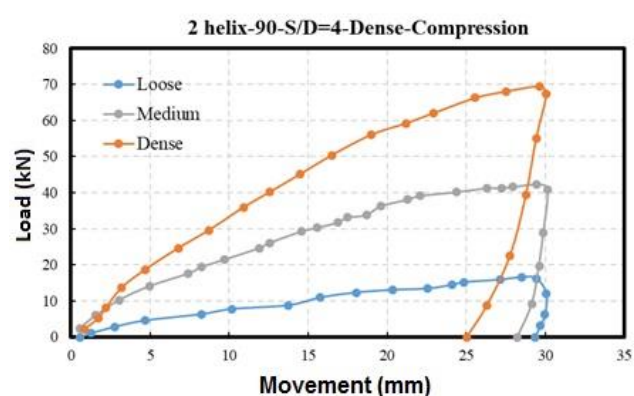


(الف)

شکل ۸: نمودار بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۶۴ میلیمتر برای S/D برابر ۳، الف) بارگذاری فشاری ب) بارگذاری کششی



(ب)

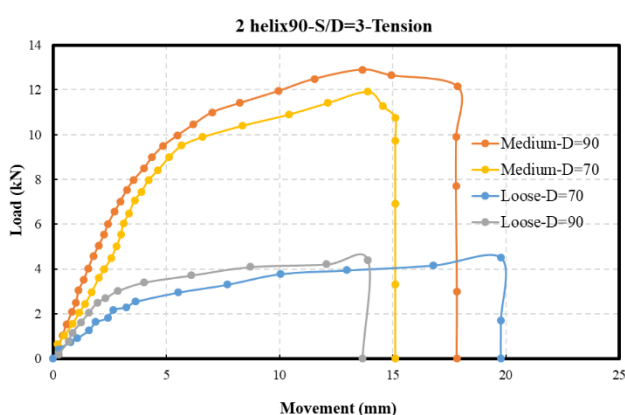


(الف)

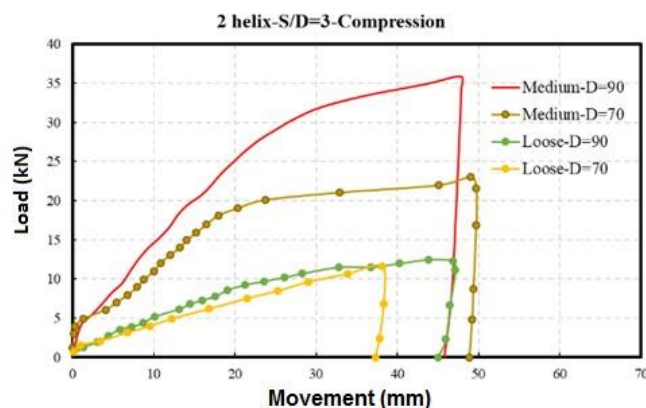
شکل ۹: نمودار بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۹۰ میلیمتر برای S/D برابر ۴، الف) بارگذاری فشاری ب) بارگذاری کششی

۳-۳- بررسی اثر قطر پره ها

در شکل ۱۰ نمودار بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۷۰ و ۹۰ میلیمتر و S/D برابر ۳ حاصل از آزمایشهای کششی و فشاری نشان داده شده است. نتایج حاصل از این نمودارها حاکی از آن است که در خاک متراکم با افزایش قطر پره ظرفیت باربری شمعها افزایش پیدا کرده است. به طوری که با افزایش قطر پرهها از ۷۰ به ۹۰ میلیمتر در ماسه متراکم، مقاومت فشاری به میزان ۵۰ درصد افزایش یافته است. این افزایش در ماسه سست برابر ۵ درصد بوده است. در آزمایشهای کششی مقدار افزایش مقاومت با افزایش قطر پرهها در حدود ۱۰ درصد بوده است. در ماسه سست و با افزایش قطر پرهها مقاومت به میزان ۲ درصد افزایش یافته است. به طور کلی مشاهده می شود که با افزایش قطر پرهها مقاومت در ماسه متراکم بیشتر از ماسه سست افزایش پیدا می کند.



(ب)



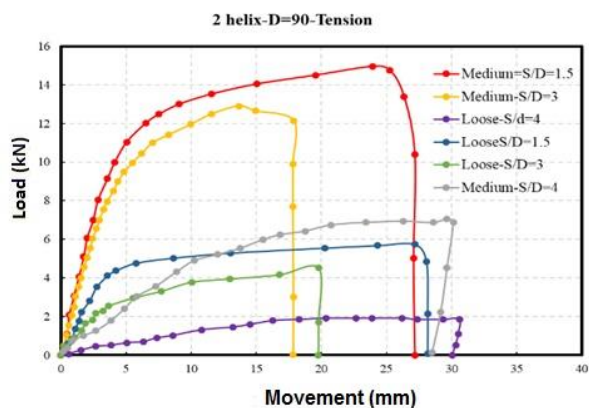
(الف)

شکل ۱۰: نمودار بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۷۰ و ۹۰ میلیمتر و S/D برابر ۳ (الف) بارگذاری فشاری (ب) بارگذاری کششی

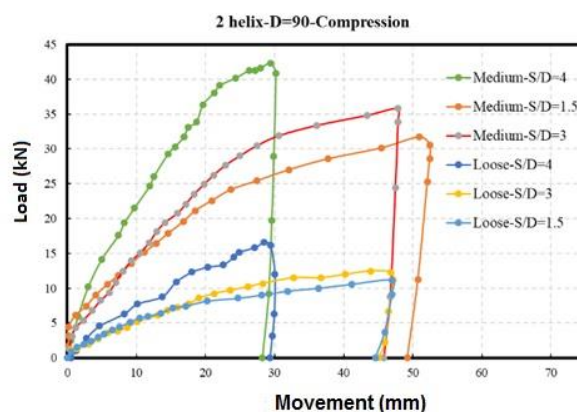
۳-۴- بررسی اثر S/D

در شکل ۱۱ نمودار بار - جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۹۰ میلیمتر و S/D های مختلف نشان داده شده است. با افزایش نسبت فاصله به قطر پره (S/D) در بارگذاری فشاری مقدار ظرفیت باربری افزایش پیدا می‌کند ولی این امر در بارگذاری کششی تا حدودی متفاوت می‌باشد و با افزایش این نسبت، ظرفیت باربری کششی در برخی موارد مقداری کاهش پیدا می‌کند. در بارگذاری فشاری بیشترین نقش را پره پایین در باربری داشته است. این امر به دلیل عدم دستخوردگی خاک زیر این پره و نیز وجود تنش محصور کننده بیشتر اطراف این پره بوده است. همچنین در بارگذاری فشاری با افزایش تعداد پره مقدار باربری افزایش پیدا می‌کند ولی همان گونه که مشاهده می‌شود به این معنی نیست که با افزایش پره از یک به دو، مقدار باربری دو برابر می‌شود. این امر به دلیل دستخوردگی خاک زیر پرها واقع در تراز بالاتر و نیز کاهش تنش محصور کننده با افزایش مقدار تراز ارتفاعی بوده است. در خاک‌های ماسه‌ای باربری بیشتری توسط کف صورت می‌گیرد و مقاومت جداری نقش محدودتری را داشته است. با افزایش مقدار نسبت فاصله (S/D) عملکرد شمع از سیلندری به منفرد تغییر یافته که این امر باعث می‌شود هر یک از پرها به صورت مجزا یک مقاومت اتکایی داشته باشند، به همین دلیل با افزایش فاصله پره مقاومت باربری فشاری افزایش پیدا می‌کند.

در بارگذاری کششی بیشترین نقش باربری، بر عهده پره واقع در تراز بالاتر بوده است. هر چه عمق استقرار پره واقع در تراز بالاتر افزایش پیدا کند مقدار تنش همه جانبه و قائم افزایش پیدا می‌کند و به تبع آن مقدار ظرفیت باربری کششی افزایش پیدا می‌کند. به همین دلیل بیشترین مقدار ظرفیت باربری کششی متعلق به شمع با نسبت فاصله $1/5$ بوده است و با افزایش مقدار نسبت فاصله ظرفیت باربری کششی کاهش پیدا کرده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: نمودار بار-جابجایی شمع دو پره با قطر پره ۹۰ میلی‌متر و S/D مختلف (الف) بارگذاری فشاری (ب) بارگذاری کششی

۴- مطالعات میدانی

مطالعات میدانی در منطقه بابلسر واقع در خط جنوبی ساحل دریای خزر صورت گرفته است. شمع پیچشی پره‌ای اجرا شده در این مطالعه از نوع شمع دو پره با نسبت فاصله (S/D) برابر ۳ بوده، که دارای طول معادل ۴ متر و عمق مدفون $3/5$ متر بوده است. برای اجرای شمع‌ها از یک دستگاه اعمال گشتاور متصل به بیل مکانیکی استفاده شده است. در این سیستم نیروی محوری توسط بیل مکانیکی تامین و گشتاور نصب توسط دستگاه اعمال گشتاور تامین می‌شود (شکل ۱۲-الف). این دستگاه همچنین قابلیت این را داشته تا در حین اجرا به صورت پیوسته مقدار گشتاور نصب را نسبت به عمق نیز اندازه‌گیری کند. برای بارگذاری شمع‌ها در میدان نیز مانند روش آزمایشگاهی از روش بارگذاری سریع استفاده شده است. شکل‌های ۱۲ ب و ج قاب بارگذاری و نحوه نیروی عکس‌العمل در بارگذاری کششی و فشاری را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نیروی عکس‌العمل در بارگذاری کششی توسط دو نیوجرسی واقع در سطح زمین تامین می‌شود و در بارگذاری فشاری این نیرو توسط ۷ نیوجرسی تامین شده است. به منظور اعمال بارگذاری از یک جک ۵۰ تن با کورس ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین مقدار نیروی اعمالی و جابجایی سر شمع به ترتیب توسط یک گیج نیروی سنج و یک جابجایی سنج الکتریکی ثبت شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۲: مراحل اجرا و نصب شمع‌های پیچشی پره‌ای در میدان (الف) سیستم اجرای شمع (ب) فریم بارگذاری فشاری (ج) فریم بارگذاری کششی

۵- تعمیم نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی به شمع‌های بزرگ مقیاس

یکی از مهمترین مسائل در مدل سازی فیزیکی در ژئوتکنیک تعمیم نتایج آزمایشگاهی به میدانی و پیش‌بینی مناسب رفتار شمع-های اجرا شده در میدان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. در مدل سازی فیزیکی باید دقت نمود مقدار تنش‌ها در مدل آزمایشگاهی و میدانی مشابه هم باشد و نیز کلیه ابعاد شمع به یک مقیاس معین کوچک شده باشد. دستگاه FCV با قابلیت تولید گرادیان تنش‌های خطی و مشابه میدان یکی از مناسب‌ترین وسایل برای مدل سازی فیزیکی شمع‌ها است. جدول ۳ مقادیر ضرایب مقیاس را برای تعمیم نتایج بدست آمده از دستگاه فشار همه جانبه مخروطی به نتایج میدان ارائه می‌کند [۱۹].

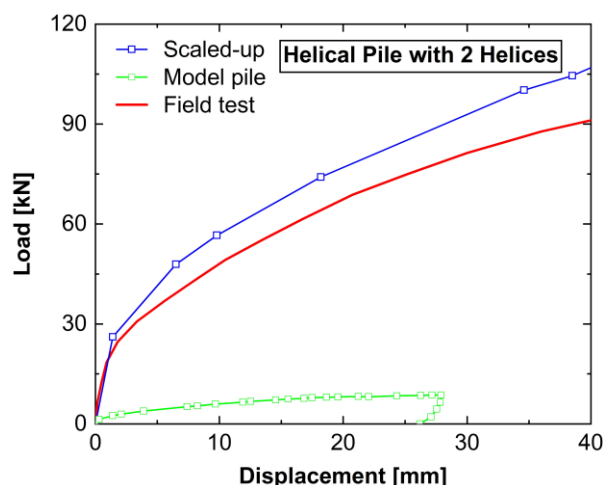
جدول ۳: ضرایب مقیاس برای پارمترهای مختلف در دستگاه FCV [۱۹]

| Parameters | Scaling Factor | Setting of factors |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------|
| Displacement and dimensions | λ_L | λ_L |
| Area | λ_A | λ_L^2 |
| Volume | λ_V | λ_L^3 |
| Mass | λ_M | λ_L^3 |
| Density | λ_ρ | 1 |
| Stress | λ_σ | 1 |
| Strain | λ_ε | 1 |
| Force | λ_F | λ_L^2 |
| Modulus | λ_E | 1 |

به منظور بررسی عملکرد دستگاه FCV در مدل سازی رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای و تایید قابلیت دستگاه FCV، نتایج بدست آمده با استفاده از روابط مقیاس مدل سازی و با نتایج مطالعات میدانی مقایسه شده است. همان گونه که در بخش‌های قبلی بیان شد، لازم است کلیه ابعاد شمع مدل آزمایشگاهی نسبت به میدانی به یک نسبت مشخص کوچک شده باشد. در جدول ۴ ابعاد شمع مدل و مشخصات ماسه در آزمایشگاهی و میدانی ارائه شده است. شکل ۱۳ نمودار بار-جابجایی را شمع‌های اجرا شده در میدان، آزمایشگاه و نیز نتایج آزمایشگاهی مقیاس شده بر اساس جدول شماره یک را نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل مشخص است نتایج بدست آمده از اثر مقیاس همخوانی خوبی با نتایج مطالعات میدانی داشته است. اختلاف موجود در بین این دو مقدار ممکن است به دلیل خطا نمونه‌سازی و همچنین خطای تنظیم دقیق فشار کف دستگاه باشد.

جدول ۴: ابعاد شمع و مشخصات ماسه مورد آزمایش در میدان و آزمایشگاه

| پارامتر | شمع بزرگ مقیاس | مدل آزمایشگاهی |
|--------------|---------------------------|---------------------------|
| عمق مدفون | ۳۵۰۰ (میلیمتر) | ۷۵۰ (میلیمتر) |
| قطر شفت | ۱۰۱ (میلیمتر) | ۲۲ (میلیمتر) |
| قطر پره | ۲۵۰ (میلیمتر) | ۵۴ (میلیمتر) |
| دانسیته ماسه | ۲۱ (کیلونیوتن بر مترمکعب) | ۲۱ (کیلونیوتن بر مترمکعب) |



شکل ۱۳: مقایسه نمودار بار-جابجایی شمع اجرا شده در میدان و شمع مقیاس شده بر اساس تئوری مقیاس

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ضمن مروری بر استفاده از شمع‌های پره‌ای، با انجام تعدادی آزمون آزمایشگاهی عملکرد این شمع‌ها در دستگاه فشار همه جانبه مخروطی تحت بارگذاری محوری کششی و فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش شامل هندسه شمع، دانسیته نسبی ماسه و نوع بارگذاری بوده است. به این منظور تعداد ۲۵ آزمایش مدل سازی فیزیکی بر روی ۶ شمع با هندسه متفاوت صورت گرفته است. همچنین به منظور تایید عملکرد دستگاه یک عدد تست میدانی بزرگ مقیاس نیز در خط ساحلی دریای خزر در شهر بابل صورت گرفته است. نتایج آزمایش به شرح ذیل می باشد:

۱- دستگاه FCV-AUT با توجه به هندسه و عملکرد خاص خود، امکان مدل سازی انواع شمع‌ها را در عمق‌ها و تنش موثرهای مختلف داشته است. نحوه توزیع تنش در این دستگاه به صورت خطی بوده است که این امر توسط سنسورهای توزیع تنش در عمق قابل تایید بوده است. همچنین نتایج آزمایش‌های تکرارپذیری در آزمایش‌های کششی و فشاری نتایج خوبی را نشان می‌دهد و تکرارپذیری خوبی در نتایج آزمایش‌ها دیده می‌شود.

۲- با افزایش قطر پره ظرفیت باربری شمع‌ها افزایش پیدا کرده است. بنابراین استفاده از شمع‌های با قطر بزرگتر امکان کسب مقاومت بالاتر را برای ما فراهم می‌کند. همچنین افزایش مقاومت با افزایش قطر پره‌ها در ماسه متراکم بیشتر از ماسه سست بوده است.

۳- با افزایش دانسیته خاک مقاومت فشاری و کششی خاک افزایش پیدا کرده است. به طوری که در آزمایش‌های فشاری نسبت مقاومت خاک نمونه‌های متراکم نسبت به نمونه‌های سست ۳ تا ۵ برابر شده و در آزمایش‌های کششی این افزایش مقاومت در حدود ۵ تا ۱۰ برابر بوده است.

۴- با مقایسه شمع‌های با $S/D=3$ نسبت به شمع‌های با $S/D=1/5$ به دلیل عملکرد شمع به صورت منفرد، این شمع‌ها دارای مقاومت بیشتری بوده است. در بارگذاری فشاری بیشترین نقش باربری توسط پره پایین بوده است ولی در بارگذاری کششی پره - بالاتر بیشترین نقش را در انتقال بار داشته است. بر همین اساس شمع ۳ پره با $S/D=3$ در بارگذاری فشاری بیشترین باربری را از خود نشان می‌دهد. اما در بارگذاری کششی شمع دو پره با $S/D=1/5$ نسبت به سایر شمع‌ها به دلیل عمق استقرار زیاد پره بالایی بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد. همچنین نسبت باربری کششی به فشاری برای شمع تک پره بیشترین مقدار نسبت به سایر شمع‌ها بوده است.

۵- نتایج بدست آمده از تئوری مقیاس همخوانی بسیار خوبی با نتایج مطالعات میدانی داشته است. که این امر نشان دهنده عملکرد مناسب دستگاه فشار همه جانبه مخروطی در مدل سازی شمع‌ها بوده است و این امکان را فراهم می‌کند تا با صرف هزینه و زمان بسیار کمتر رفتار درستی از شمع‌های اجرا شده در میدان داشته باشیم.

مراجع

- [۱] Lin, C., & Jiang, W. (2019). Evaluation of vertical effective stress and pile tension capacity in sands considering scour-hole dimensions. *Computers and Geotechnics*, 105, 94-98.
- [۲] Eslami, A., & Fellenius, B. H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 886-904.
- [۳] Rahil, F. H., Al-Neami, M. A., & Al-Zaho, K. A. N. (2016). Effect of relative density on behavior of single pile and piles groups embedded with different lengths in sand. *Eng. Technol. J*, 34(6).
- [۴] Perko, H. A. (2009). *Helical piles: a practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons.
- [۵] Tsuha, C. D. H. C., Aoki, N., Rault, G., Thorel, L., & Garnier, J. (2007). Physical modelling of helical pile anchors. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 7(4), 01-12.
- [۶] El Naggar, H., & Ezzeldin, I. (2021). Evaluation of the Static Design Procedure in the Canadian Foundation Engineering Manual for Piles in Cohesionless Soil. *Geosciences*, 11(11), 472.
- [۷] Sakr, M. (2009). Performance of helical piles in oil sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(9), 1046-1061.
- [۸] Vickars, R. A., & Clemence, S. P. (2000). Performance of helical piles with grouted shafts. In *New technological and design developments in deep foundations* (pp. 327-341).
- [۹] Mansour, M. A., & El Naggar, M. H. (2022). Optimization of grouting method and axial performance of pressure-grouted helical piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(5), 702-714.
- [۱۰] Huang, Y., Zhuang, X., Wang, P., & Zong, Z. (2022). Axial behavior of pressure grouted helical piles installed in marine soft clay based on full-scale field tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(12), 5799-5812.
- [۱۱] Abbase, H. O. (2017). Pullout capacity of screw piles in sandy soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 4(1), 8-12.
- [۱۲] Krishnaswamy, N. R., & Parashar, S. P. (1994). Uplift behaviour of plate anchors with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(2), 67-89.
- [۱۳] 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.
- [۱۴] 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.
- [۱۵] Fakharian, K., Shafiei, M., & Hafezan, S. (2022). Investigation of soil setup effects on pile response in clay considering overconsolidation ratio and installation method through physical modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(4), 488-503.
- [۱۶] 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*, 1-14.
- [۱۷] Bhattacharya, S., Demirci, H. E., Nikitas, G., Prakhya, G. K. V., Lombardi, D., Alexander, N. A., ... & Mylonakis, G. (2021). Physical modeling of interaction problems in geotechnical engineering. In *Modeling in Geotechnical Engineering* (pp. 205-256). Academic Press.

- [۱۸] Zare, M., & Eslami, A. (2014). Study of deep foundation performances by frustum confining vessel (FCV). *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 271-280.
- [۱۹] Sedran, G. (1999). *Experimental and analytical study of a frustum confining vessel* (Doctoral dissertation).
- [۲۰] Zarrabi, M., & Eslami, A. (2016). Behavior of piles under different installation effects by physical modeling. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 04016014.
- [۲۱] Shojaei, E., Eslami, A., & Ghanjiyan, N. (2022). Experimental and Comparative Investigations of New Self-Expanded Steel Pile Behavior via Physical Modelling. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58(6), 482-490.
- [۲۲] Karimi, A. H., Eslami, A., Zarrabi, M., & Khazaei, J. (2017). Study of pile behavior by improvement of confining soils using frustum confining vessel. *Scientia Iranica*, 24(4), 1874-1882.