

## مطالعه آزمایشگاهی و صحرایی عملکرد شمع‌های پیچی در خاک ماسه‌ای

سید فرهاد نبی زاده<sup>۱\*</sup>، عسکر جانعلی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

## چکیده

توسعه روش‌های مختلف در ساخت پی‌های عمیق می‌تواند عاملی در جهت اجرای هرچه بهتر و بهینه‌تر پروژه‌های عمرانی بویژه در مناطق دارای خاک‌های مسأله‌دار باشد. شمع‌های پیچشی پره‌ای بواسطه دارا بودن محاسنی همچون سرعت بالای اجراء، گستردگی دامنه کاربرد در خاک‌های مختلف، اجرای بدون صدا و ارتعاش، عملکرد مؤثر در فشار و کشش، تقویت پی‌های موجود و غیره در مقایسه با دیگر شمع‌های رانشی و یا درجاریز از جمله پرکاربردترین پی‌های عمیق محسوب می‌گردند. در این مقاله به بررسی عملکرد شمع‌های پیچی تک پره، دو پره و سه پره در شرایط بدون تزریق و با تزریق بوسیله مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه و همچنین مطالعه صحرایی پرداخته شده است. مدلسازی به کمک دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV) بر روی خاک ماسه ای انجام پذیرفت. همچنین اثر پس‌تزریق بر مقاومت این‌گونه شمع‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نتایج آزمایشات بارگذاری فشاری با روش تحلیلی مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد عملکرد استوانه ای در خاکهای ماسه ای در شمع‌های پیچی مناسب نیست و با افزایش تعداد پره‌ها ظرفیت باربری شمع‌ها کاهش یافته است. عمل تزریق در شمع‌های سه پره باعث افزایش مقاومت بیشتری نسبت به شمع‌های تک پره و دو پره شده است.

کلمات کلیدی: ظرفیت باربری، شمع‌های پیچی، مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، پس‌تزریق.

\*نویسنده مسئول: سید فرهاد نبی زاده

پست الکترونیکی: f\_nabizadeh2002@yahoo.com

شناسه دیجیتال DOI:10.22065/jsce.2016.40247

http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.40247

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۷

بارهای طراحی بزرگ، خاک ضعیف در عمق‌های سطحی و محدودیت‌های سایت بعضی از دلایل استفاده از پی‌های عمیق می‌باشد. استفاده از شمع‌های پیچی به عنوان یک نمونه پی عمیق به‌طور قابل توجهی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. هم اکنون بیش از ۵۰ شرکت در سراسر دنیا انواع مختلف شمع‌های پیچی را تولید می‌کنند [۱-۴]. در ۱۷۰ سال گذشته به صورتهای مختلفی از شمع‌های پیچی استفاده شده است. الکساندر میچل، یک مهندس عمران ایرلندی است که به عنوان مخترع اولین شمع حلزونی که در طراحی پایه برای فانوس‌های دریایی استفاده شد شناخته شده است [۵]. شمع‌های پیچی، شمع‌هایی هستند که جنس آنها فلزی بوده و به صورت یک پیچ بزرگ ساخته می‌شوند. این شمع‌ها به سبب وجود پره‌های پیچی در سرتاسر طول شمع درگیری مناسبی با خاک اطراف دارند و لذا نسبت به شمع‌های مشابه مقاومت بالاتری را در برابر فشار و برکنش از خود نشان می‌دهند [۶].

در سالهای اخیر به دلیل تولید ماشینهای هیدرولیکی با قدرت بالا که توان اعمال لنگرهای پیچشی و حفاری دورانی با اعمال نیروهای زیاد را دارند استفاده از شمع‌های مارپیچ و یا پیچشی به عنوان یک شمع کامل (برای تحمل کشش و فشار) مورد بحث و توجه قرار گرفته است [۷]. در سال ۲۰۰۵ دانشگاه البرتای کانادا از ماشینی رونمایی کرد که توان اعمال لنگر پیچشی از محدوده ۶/۱ تا ۱۰۸/۵ کیلونیوتن-متر را دارا بود و تنها یکسال بعد ماشینهایی برای وارد کردن لنگرهای به بزرگی ۳۳۹ کیلونیوتن - متر به بازار آمدند از اینرو طراحی این شمع‌ها نیز با قطرها و طولهای بزرگتر مدنظر قرار گرفت و اجرای شمع‌های مارپیچ با قطر شفت ۲۰ اینچ در خاکهای بسیار متراکم نیز امکانپذیر شد [۸]. در سال ۲۰۰۹ سکر و همکارانش در دانشگاه البرتا اعلام نمودند که در صورت یکسان بودن قطر شفت شمع مارپیچ با قط یک شمع فلزی، شمع مارپیچ در برابر فشارهای برکنش او بارهای فشاری ظرفیتی حدود ۳ تا ۵ برابر بیش از شمع‌های فلزی کوبیده شده دارد. از اینرو استفاده از شمع‌های مارپیچ توجیه اقتصادی دارد لذا می‌توان اندازه آن را از شمع فلزی کوچکتر در نظر گرفت. یافته‌های این پژوهشگران نشان می‌دهد که ظرفیت کششی این شمع‌ها در حدود ۸۰٪ ظرفیت فشاری آنها می‌باشد [۹]. در سال ۲۰۱۰ آقای محمد سکر در یک آزمایش شمع واقعی در کانادا با مونیتورینگ تغییر شکل‌ها نشان داد که با افزایش قطر مارپیچ‌ها مقدار تغییر شکل نیز همراستا با بالارفتن ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و لذا چنانچه نسبت بار به تغییرمکان را در نظر بگیریم می‌توان گفت که اضافه کردن قطر مارپیچ‌ها تأثیری بر کاهش نشست ندارد [۹]. همچنین استفاده از نتایج آزمایش درجای CPT و CPTu برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌های پیچی قابل استناد می‌باشد [۱۰]. اسپرینس و پاکراستینج<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۰ بر روی مقاومت و ظرفیت فشاری شمع‌های پیچی پره‌ای صورت دادند نتایج تحلیلی و پیش‌نهادی سه روش ارزیابی شامل آئین‌نامه ساختمانی لتونی (LBN 214-03)، روش شرکت امریکایی چنس (A.B.CHANCE-2003) و روش مهندسی ساختمان کانادا را با یکدیگر مقایسه نمودند [۱۱].

از روش تزریق برای بهبود ظرفیت باربری و همچنین افزایش مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های خورنده استفاده می‌شود. ویکر و کلمنس با تزریق در لوله مرکزی شمع‌های پیچی نشان دادند که عمل تزریق باعث افزایش مقاومت شمع و افزایش ظرفیت باربری شمع می‌شود [۱۲].

در این مقاله به بررسی عملکرد شمع‌های پیچی تک‌پره، دوپره و سه‌پره در شرایط بدون تزریق و با تزریق بوسیله مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه به کمک دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی (FCV) و همچنین مطالعه صحرایی بر روی خاک ماسه‌ای پرداخته شده است.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

وجود مزیت‌هایی چون تکرارپذیری، هزینه و زمان کم اجرا و دقت بالای کنترل پارامترها در مقایسه با روش‌های مطالعه میدانی سبب شده تا امروزه روش مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه مورد توجه قرار گیرد. یکی از مشکلات اساسی مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس، پایین بودن سطح تنش در مدل‌های ساخته‌شده در محفظه ساده نسبت به واقعیت است. در این راستا و برای بهبود این مشکل مدل‌سازی‌های

1 Uplift  
2 Sprince  
3 Pakrastinsh

فیزیکی در محفظه کالیبره (CC)، دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی و یا دستگاه آزمایش FCV مطرح شدند. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده دستگاه FCV برای مدل‌سازی رفتار شمع‌ها است. دستگاه FCV یک مخزن با شکل مخروط ناقص است که خاک در درون آن قرار گرفته و فشار محصورکننده از انتهای مخزن و توسط پیستون یا غشای لاستیکی و فشار روغن به خاک اعمال می‌شود. تنش قائم در سطح بالایی خاک درون مخزن صفر بوده و با افزایش عمق به مقدار آن افزوده می‌گردد. تنش‌های جانبی توده خاک نیز تابعی از تنش قائم و خواص مکانیکی خاک است که با افزایش عمق به میزان آن‌ها افزوده می‌شود. بنابراین شمع مدل‌شده در این مخزن بیشترین انطباق را به لحاظ شرایط تنش خاک با واقعیت بیرونی دارا است.



شکل ۱: نمای اصلی به همراه ابعاد دستگاه FCV.

مدلسازی فیزیکی به کمک دستگاه FCV در دانشگاه امیرکبیر انجام شده است. دستگاه FCV دانشگاه امیرکبیر دارای ۱۳۰ سانتی‌متر ارتفاع بوده و قطر کف آن ۱۳۵ سانتی‌متر و قطر بالایی آن ۳۰ سانتی‌متر است. نمونه واقعی دستگاه در شکل ۶ نشان داده شده است. بدنه اصلی دستگاه از ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و به صورت دو تکه جداشدنی در فاصله ۷۰ سانتی‌متری از کف، جهت سهولت در امر نمونه‌سازی، ساخته شده است. در کف آن، یک صفحه فولادی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر قرار داده شده تا غشای لاستیکی، بین آن و کف دستگاه قرار گیرد تا از طریق آن بتوان فشار کف را اعمال نمود. شکل ۱ نمای اصلی دستگاه FCV را نشان می‌دهد.

برای انجام کلیه آزمایش، از ماسه بابل‌سر (سایت) با اندازه متوسط دانه‌های (D<sub>50</sub>) ۰/۱۸ میلی‌متر استفاده شده است. مقدار ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب دانه‌بندی (Cc) ماسه مذکور به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۲۲ است که بر اساس روش طبقه‌بندی متحد (Unified Method) خاک از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) است.

آزمایش تعیین تراکم دانسیته نسبی (وزن مخصوص بیشینه و کمینه) مطابق استانداردهای ASTM D4253 و ASTM D4254 انجام شده است. میزان وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه ماسه مورد نظر ۱/۷۹۹ و ۱/۴۸۵ تن بر مترمکعب است. این آزمایش در خاک ماسه‌ای متوسط (با تراکم مشابه در سایت) در فشار کف ۱۰۰ کیلوپاسکال (برابر فشار وارده در انتهای شمع در عملیات صحرائی) انجام شد. در جدول ۱ مشخصات شمع‌های استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات شمع در دستگاه FCV

شمع	تعداد پره	قطر شفت (cm)	قطر پره (cm)	نسبت فاصله پره‌ها از هم به قطر پره (s/d)	فاصله آخرین پره از انتهای شمع (cm)	عمق شمع (cm)
1-helix	۱	۳/۴	۷	-	۷	۷۰
2-helix	۲	۳/۴	۷	۳	۷	۷۰
3-helix	۳	۳/۴	۷	۱/۵	۷	۷۰

شکل ۲ شمع‌های استفاده شده و شکل ۳ آزمایش بارگذاری بر روی شمع پیچی سه پره در دستگاه FCV را نشان می‌دهد.



شکل ۳: شمع های استفاده شده در دستگاه FCV.



شکل ۲: انجام آزمایش بارگذاری شمع پیچی سه پره.

به منظور انجام عملیات تزریق از یک پیستون برای ایجاد محفظه تحت فشار استفاده شد. برای تأمین فشار پایدار محفظه، از کمپرسور موجود استفاده شد. در این روش در مسیر دستگاه کمپرسور به محفظه آب و هوا که وظیفه تأمین فشار کف دستگاه را بر عهده داشت، یک خروجی، اضافه گردید. پس از آن فشار کمپرسور تا رسیدن به فشار مورد نیاز که از روی گیج تعبیه شده روی دستگاه پس تزریق کنترل می شد، افزایش می یافت. بر روی شمع ها به فاصله هر چهار سانتیمتر یک سوراخ ۵ میلیمتری تعبیه گردید. مخلوط آب و سیمان (W/C) با نسبت ۰/۵۵ و با سیمان پرتلند نوع II مخلوط گردید و برای آنکه عملیات تزریق به خوبی صورت گیرد در خاک ماسه‌ای با فشار ۸ بار تزریق صورت گرفت. در دستگاه FCV، تا وقتی فشار تزریق ۴ بار بود، تزریقی انجام نمی شد. برای همین منظور فشار تزریق از ۵ بار آغاز شد و برای ۸ بار نیز انجام شد. شکل ۴ دستگاه تزریق و شکل ۵ سیمان تزریق شده در زیر پره شمع را نشان می دهد.



شکل ۵: تزریق سیمان در خاک اطراف شمع پیچی در دستگاه FCV.



شکل ۴: دستگاه تزریق در FCV.

### ۳- عملیات صحرائی

عملیات صحرائی شامل تهیه، اجرا و آزمایش بارگذاری استاتیکی در سایت با خاک ماسه‌ای می باشد. این سایت در نزدیکی شهر سرخرود بابلسر قرار دارد. مطالعات ژئوتکنیک نشان می دهد که سایت شامل خاک ماسه‌ای به همراه ذرات لای می باشد. در منطقه مورد بررسی از سطح زمین تا عمق ۶ متری خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده (SP) و از عمق ۶ متری تا ۲۰ متری خاک ماسه‌ای همراه با خاک ریزدانه لای (SM) می باشد. تراز آب زیرزمینی در عمق ۶ متری از سطح زمین قرار دارد. بر اساس مطالعات انجام شده اعداد SPT تا عمق ۶ متری به طور متوسط برابر ۱۹ و از عمق ۶ متری تا عمق ۲۰ متری به طور متوسط برابر ۲۲ می باشد. در مطالعات صحرائی شمع‌های پیچی به صورت تک پره،

دوپره و سه‌پره استفاده شده است که قطر لوله برابر ۱۱۷ میلی‌متر و قطر پره‌ها برابر ۲۵۰ میلی‌متر و عمق شمع‌ها برابر ۶ متر می‌باشد. مشخصات شمع در جدول ۲ ارائه شده است. شکل ۶ تصویر واقعی شمع را که در این مطالعات استفاده شده است نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات شمع‌های پیچی

مشخصات	عمق (m)	قطر پره (mm)	قطر لوله (mm)	تعداد پره	مشخصات
شمع پیچی	۶	۲۵۰	۱۱۷	۱،۲،۳	شمع پیچی



شکل ۶: تصویر شمع واقعی.

شمع‌های پیچی به وسیله ترکیب دو عمل چرخش و فشار که توسط یک ماشین هیدرولیک اعمال می‌شود در درون زمین فرورانده شده است. عمل چرخش به بالای شمع پیچی اعمال شده است. عمل چرخش و فشار با کمترین سرعت موتور هیدرولیکی اعمال شده تا کمترین دست‌خوردگی در خاک به وجود آید. گشتاور ایجاد شده برای اجرای این شمع‌ها که توسط موتور اعمال شده است (N.M - ۱۰۰۰۰۰) می‌باشد. ارتباط بین موتور و شمع‌ها بایستی به صورت خطی، مستقیم و صلب باشد. میله مرکزی شمع پیچی به وسیله یک پین قوی هم‌بعد میله مرکزی برای راندن شمع به دستگاه متصل شده است. اجرای شمع‌ها به وسیله اتصال سر شمع به موتور چرخشی به کمک یک پین قوی انجام شده است. شمع در محل مورد نظر به صورت مستقیم و صاف قرار می‌گیرد و به کمک فشار موتور و قبل از اعمال چرخش در محل ثابت می‌شود و با اعمال چرخش شمع به‌طور پیوسته و با چرخش کمتر از ۳۰ دور در دقیقه در درون خاک با فشار رانده می‌شود. شمع‌ها تا بدست آوردن معیارهای لازم برای حصول نتایج ادامه می‌یابد. معیار اتمام شمع‌های پیچی شامل دستیابی به چرخش نهایی نصب و به دست آوردن حداقل عمق می‌باشد [۲]. در سایت اشاره شده دو عدد شمع تک‌پره، دو عدد شمع دوپره و دو عدد شمع سه‌پره اجرا شده است که یکی از هر کدام این شمع‌ها به صورت بدون نریق و یک شمع دیگر به صورت پس تزریق اجرا شده است. شکل ۷ اجرای شمع‌های پیچی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: اجرای شمع‌های پیچی پره دار.

آزمایش بارگذاری محوری فشاری مطابق استاندارد ASTM-D1143-07 انجام شده است. از آنجا که هدف اصلی از آزمایش بارگذاری تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع بوده است روش A (تست سریع) که در طول دوره کوتاه از فواصل زمانی بار به صورت مرحله‌ای افزایش می‌یابد استفاده شده است [۱۳]. شکل ۸ آزمایش بارگذاری را بر روی شمع‌ها نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۸: بارگذاری استاتیکی شمعهای پیچی در سایت.

به منظور انجام تزریق در شمع یک سوراخ ۸ میلیمتری در هر چهار طرف بر روی بدنه شمع تعبیه گردید. مخلوط آب و سیمان (W/C) با نسبت ۰/۵۵ و با سیمان پرتلند نوع II در درون یک میکسر کلوئیدی مخلوط گردید و برای آنکه عملیات تزریق به خوبی صورت گیرد در خاک ماسه‌ای با فشار ۸ بار تزریق صورت گرفت که در شکل ۵ عملیات تزریق در هر دو سایت نشان داده شده است. پس از گذشت حدود ۲۸ روز از اجرای عملیات تزریق آزمایش بارگذاری فشاری بر روی شمع‌ها مطابق استاندارد انجام پذیرفت.

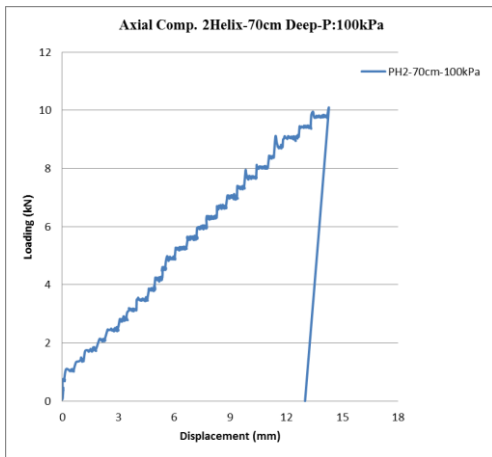


شکل ۹: عملیات تزریق در شمع پیچی.

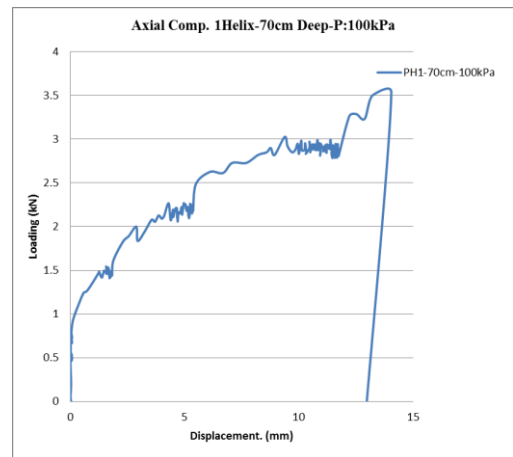
با توجه به آزمایشات انجام شده نتایج زیر قابل استنتاج می‌باشد.

#### ۴- بحث در نتایج

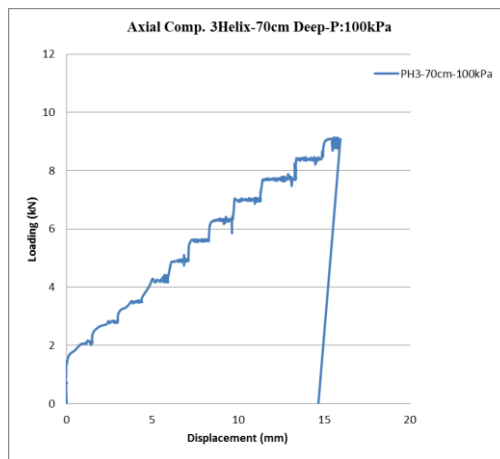
همانطور که اشاره شد در آزمایشگاه در درون دستگاه FCV سه عدد شمع پیچی بصورت تک پره، دو پره و سه پره بصورت بدون تزریق و با تزریق مورد آزمایش قرار گرفت. نسبت فاصله پره‌ها به قطر (S/D) به ترتیب برابر ۱/۵ و ۳ برای شمع‌های دوپره و سه‌پره می‌باشد. در شکل ۱۰ نتایج آزمایش بارگذاری فشاری را برای شمع بدون تزریق نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰: نتایج آزمایش بارگذاری شمع های بدون تزریق در دستگاه FCV. الف) تک پره، ب) دو پره، ج) سه پره.

نتایج آزمایشات نشان می دهد که ظرفیت باربری شمع دو پره از ظرفیت شمع های تک پره و سه پره بیشتر است. در ماسه در شمع سه پره دستخوردگی ماسه ناشی از راندن سه پره افزایش می یابد که علت آنست که فشار جانبی در خاک ماسه ای کاهش و نهایتاً مقاومت نهایی شمع کاهش می یابد. همچنین به علت کوتاه بودن شمع در آزمایشگاه و کم بودن سطح تنش ظرفیت باربری شمع سه پره نسبت به شمع دو پره کاهش یافته است. این نتیجه نشان می دهد عملکرد استوانه ای در خاکهای ماسه ای در شمع های پیچی مناسب نیست. همانطور که مشاهده می شود در نتایج آزمایشگاهی، مقاومت کمتری در شمعهای سه پره که دارای نسبت فاصله به قطر ۳ ( $S/D=3$ ) می باشد زیرا در این نوع شمعها مقاومت نهایی بر اساس مقاومت اتکایی می باشد. همانطور که از نمودارهای شکل ۶ مشاهده می شود سختی اولیه شمع سه پره از شمع دوپره و تک پره بیشتر است که نتایج آزمایشگاه با نتایج کلمنس و همکاران مطابقت دارد [۱۲]. همانطور مطابق جدول ۴ افزایش تعداد پره ها باعث افزایش مقاومت نمی شود زیرا تعداد و افزایش پره ها باعث دستخوردگی بیشتر خاک و کم شدن مقاومت نهایی می گردد. نتایج تحلیلی در شمعهای تک پره تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که به علت دستخوردگی کمتر و بر هم خوردگی خاک ظرفیت باربری نهایی با دقت بیشتری قابل تحصیل می باشد.

به منظور مقایسه روش تحلیلی با نتایج آزمایش بارگذاری در FCV از روش (2006) CFEM استفاده شده است [۱۴]. مطابق روش راهنمای مهندسی پی کانادا میزان مقاومت نوک پره ها و مقاومت جدار شفت از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (1)$$

$$Q_b = A_t N_t \sigma'_z \quad (2)$$

$$Q_s = A_s (C' + \beta \sigma'_z) \quad (3)$$

که در آن  $A_t$  مساحت پره،  $N_t$  ضریب ظرفیت باربری،  $\sigma'_z$  تنش موثر در عمق قرارگیری پره ها،  $C'$  چسبندگی موثر،  $A_s$  مساحت جانبی شفت و  $\beta$  ضریب فشار جانبی می باشد. در جدول ۳ نتایج آزمایشات بارگذاری برای شمعیهای بدون تزریق و با تزریق به همراه محاسبات تحلیلی ارائه شده است:

جدول ۳: مقایسه نتایج آزمایشات بارگذاری در آزمایشگاه (FCV) و روش تحلیلی (CFEM(2006))

شمع	$Q_{u,CFEM}$					$Q_{u,FCV}$	$Q_{u,CFEM}/Q_{u,FCV}$
	$\beta$	$N_t$	$Q_b(kN)$	$Q_s(kN)$	$Q_u(kN)$		
1-Helix	۰/۴	۴۰	۳/۱۱	۰/۶۸	۳/۷۹	۳/۷۰	۱/۰۳
2-Helix	۰/۴	۴۰	۹/۸۰	۰/۶۸	۱۰/۴۸	۹/۸۶	۱/۰۷
3-Helix	۰/۴	۴۰	۸/۸۷	۱/۰۸	۹/۹۶	۹/۰۶	۱/۱۰

نتایج تحلیلی در شمعیهای تک پره تطابق مناسبتری با نتایج آزمایشگاهی دارد که به علت دستخوردگی کمتر و برهم خوردگی خاک ظرفیت باربری نهایی با دقت بیشتری قابل تحصیل می باشد. در شمعیهای سه پره تطابق کمتری نسبت به شمعیهای دو پره و تک پره به دلیل برهم زده شدن خاک بین نتایج تحلیلی و نتایج اندازه گیری شده در آزمایشگاه مشاهده شده است.

پس از گذشت ۷۲ ساعت پس از تزریق آزمایشات بارگذاری فشاری بر روی شمع تزریق شده انجام شده است. نتایج آزمایشات بارگذاری شمعیهای پس تزریق در دستگاه FCV و مقایسه آن با شمعیهای بدون تزریق در جدول ۴ نشان داده شده است:

جدول ۴: مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری در شمعیهای بدون تزریق و پس تزریق در آزمایشگاه (FCV)

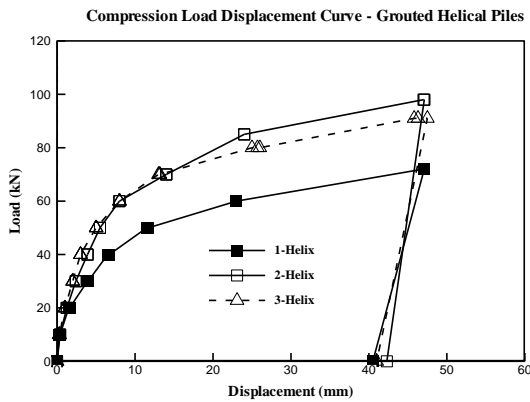
شمع	$Q_u, \text{Un-grouted}$	$Q_u, \text{Post-grouted}$	$Q_u, \text{Post-grouted}/Q_u, \text{Un-grouted}$
1-Helix	۳/۷۰	۴/۸۸	۱/۳۲
2-Helix	۹/۸۶	۱۳/۴۴	۱/۳۶
3-Helix	۹/۰۶	۱۲/۷۷	۱/۴۱

نتایج نشان می دهد در شمع تک پره در خاکهای ماسه ای ظرفیت باربری فشاری پس از تزریق حدوداً ۳۲٪ افزایش پیدا کرده است. مشابه شمع تک پره در شمعهای دوپره نیز مقاومت شمعها حدوداً ۳۶٪ افزایش پیدا کرده است. اما در شمعهای سه پره بار نهایی در حالت پس از تزریق حدود ۴۱٪ افزایش یافته است. روند افزایش مقاومت در ظرفیت باربری نهایی در آزمایشگاه مشابه نتایج آزمایش بارگذاری در سایت است. در آزمایشگاه در شمع سه پره افزایش مقاومت بیشتر نسبت به سایت نشان می دهد. علت افزایش بیشتر مقاومت در شمع سه پره به هم خوردگی خاک ماسه ای ناشی از راندن و تعداد بیشتر پره ها می باشد و به دلیل تزریق نفوذی مقاومت جداری افزایش یافته است و باعث افزایش مقاومت در خاک در شمع سه پره شده است.

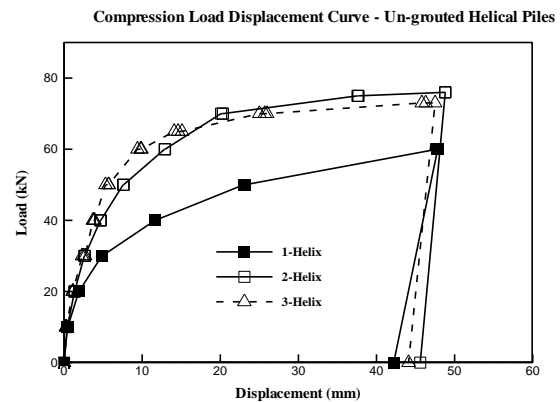
همانطوری که اشاره شد ۶ عدد شمع تک پره، دوپره و سه پره در سایت شامل خاک ماسه ای اجرا شده است که از این ۶ عدد شمع ۳ عدد بدون تزریق و ۳ عدد با تزریق مورد استفاده قرار گرفته است. نسبت فاصله پرها به قطر (S/D) به ترتیب برابر ۱/۵ و ۳ برای شمعهای دوپره و سه پره می باشد. در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ منحنیهای بار-جابجایی برای بارگذاری فشاری در شمعها در سایت نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد در شمع تک پره در خاکهای ماسه ای ظرفیت باربری فشاری پس از تزریق حدوداً ۱۴٪ افزایش پیدا کرده است و شیب منحنی بار-جابجایی کمتر شده است. مشابه شمع تک پره در شمعهای دوپره نیز مقاومت شمعها حدوداً ۲۱٪ افزایش پیدا کرده است. اما در شمعهای سه پره بار نهایی در حالت پس از تزریق حدود ۲۴٪ افزایش یافته است. به طور کلی منحنیهای بار-جابجایی را می توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد. بخش اول به صورت خطی با جابجایی در حدود ۱/۵ میلیمتر انجام می شود و به دنبال آن یک جزء غیرخطی که ۲۵ تا ۴۵



میلیمتر متفاوت بوده است مشاهده می شود. از منحنی ها مشاهده می شود که شمع های تزریق شده تغییر مکان کمتری نسبت به شمع های بدون تزریق دارند که نشان می دهد عملیات تزریق باعث افزایش مقاومت شمع ها شده است.



شکل ۱۲: نتایج آزمایش بارگذاری شمع های پس تزریق در سایت.



شکل ۱۱: نتایج آزمایش بارگذاری شمع های بدون تزریق در سایت.

در خاک ماسه ای در شمع سه پره ظرفیت باربری نسبت به شمع دو پره کاهش یافته است که نشان می دهد در شمع سه پره به دلیل دستخوردگی ماسه فشار جانبی کم می شود و مقاومت جداری کاهش می یابد. عملکرد استوانه ای در خاکهای ماسه ای در شمع های پیچی مناسب نیست و مقاومت شمع بر اساس مقاومت اتکایی می باشد. اما با عملیات تزریق مقاومت شمع حدود ۴٪ نسبت به شمع دو پره افزایش می یابد. در خاک ماسه ای نشان داده می شود که سختی اولیه در شمع سه پره بیشتر و به ترتیب در شمع دو پره و تک پره کمتر می گردد که با نتایج کلمنس نیز تطابق دارد [۱۲]. در خاک ماسه ای به دلیل تزریق نفوذی مقاومت جداری افزایش یافته است. افزایش تعداد پره در خاک ماسه ای به دلیل دستخوردگی باعث کاهش فشار جانبی و در نتیجه مقاومت جداری کم می شود. به دلیل کوتاه بودن شمع ها تنش سربار کم بوده و تاثیر مقاومت اصطکاکی کم می باشد اما با تزریق چسبندگی افزایش یافته و مقاومت شمع در حالت پس تزریق افزایش می یابد.

به منظور مقایسه روش تحلیلی با نتایج آزمایش بارگذاری در سایت از روش CFEM(2006) استفاده شده است. در جدول ۵ نتایج آزمایشات بارگذاری فشاری اندازه گیری شده برای سایت برای شمعهای بدون تزریق به همراه محاسبات تحلیلی ارائه شده است.

جدول ۵: مقایسه نتایج آزمایشات بارگذاری فشاری در سایت و روش تحلیلی CFEM(2006)

شمع	$Q_{u,CFEM}$				$Q_{u,Site}$	$Q_{u,CFEM}/Q_{u,Site}$
	$\beta$	$N_t$	$Q_b(kN)$	$Q_s(kN)$		
1-Helix	۰/۴	۴۰	۱۶/۴	۴۵/۸	۶۲/۲	۱/۰۶
2-Helix	۰/۴	۴۰	۲۹	۴۶/۹	۷۵/۹	۱/۰۱
3-Helix	۰/۴	۴۰	۱۶/۴	۶۰	۷۶/۴	۱/۰۴

جدول ۵ انطباق مناسب نتایج آزمایش بارگذاری فشاری در سایت و نتایج تحلیلی را نشان می دهد.

#### ۴-۱- مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری سایت و آزمایشگاه

با توجه به اینکه آزمایشات در آزمایشگاه و سایت در یک نوع خاک و در یک سطح تنش انجام شده است نتایج حاصل از تزریق در شمع نشان می دهد که نسبت ظرفیت باربری در حالت پس از تزریق و بدون تزریق دارای تشابه نزدیکی نسبت به هم می باشد. جدول ۶ مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری در شمعهای بدون تزریق و پس تزریق در آزمایشگاه (FCV) و سایت نشان می دهد.

جدول ۶: مقایسه نتایج آزمایش بارگذاری در شمعهای بدون تزریق و پس تزریق در آزمایشگاه (FCV) و سایت

شمع	FCV		Site	
	$Q_u, \text{Post-grouted}$	$Q_u, \text{Un-grouted}$	$Q_u, \text{Post-grouted}$	$Q_u, \text{Un-grouted}$
1-Helix	۱/۳۲		۱/۱۴	
2-Helix	۱/۳۶		۱/۲۱	
3-Helix	۱/۴۱		۱/۲۴	

همانطور که مشاهده می شود نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت بدون تزریق و پس از تزریق هم در آزمایشگاه و هم در سایت دارای روند افزایشی مناسبی می باشد. هر چند سطح تنش در هر دو حالت یکسان می باشد اما در دستگاه FCV تزریق عملکرد بهتری را از خود نشان می دهد زیرا در آزمایشگاه کنترل بهتری در عمل تزریق صورت گرفته است. در شمع سه پره، تزریق بیشترین تاثیر را بر ظرفیت باربری داشته است که به دلیل دست خوردگی ناشی از راندن شمع، اثر تزریق بر شمع سه پره بیشتر از شمع تک پره و دو پره بوده است.

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد شمعهای پیچی تک پره، دو پره و سه پره در سایت با مقیاس واقعی و آزمایشگاه (FCV) در حالت بدون تزریق و با تزریق در خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با روش تحلیلی مقایسه گردید. علاوه بر این اثر تزریق در ظرفیت باربری این شمعها مورد بررسی قرار گرفت. جمع بندی نتایج آزمایش را بصورت زیر می توان جمع بندی نمود:

- عملکرد استوانه ای در خاکهای ماسه ای در شمعهای پیچی مناسب نیست و همانطور که مشاهده می شود هم در روش تحلیلی و هم در نتایج آزمایشگاهی در شمعهای سه پره که دارای نسبت فاصله به قطر ۳ ( $S/D=3$ ) می باشد مقاومت کمتری نتیجه می دهد.
- در خاک ماسه ای به دلیل تزریق نفوذی مقاومت جداری افزایش یافته است. افزایش تعداد پره در خاک ماسه ای باعث دستخوردگی و کاهش فشار جانبی و در نتیجه مقاومت جداری کم می شود. همچنین به دلیل کوتاه بودن شمع ها، تنش سربار کاهش یافته و مقاومت اصطکاکی کاهش می یابد که با عمل تزریق نفوذی مقاومت شمع در حالت پس تزریق افزایش می یابد.
- نتایج تحلیلی به روش CFEM [۱۴] تطابق مناسبی با نتایج اندازه گیری شده در سایت و آزمایشگاه را نشان می دهد.
- در خاک ماسه ای نشان داده می شود که سختی اولیه در شمع سه پره بیشتر و به ترتیب در شمع دو پره و تک پره کمتر می گردد.
- مشاهده می شود که شمعهای تزریق شده تغییر مکان کمتری نسبت به شمعهای بدون تزریق دارند که نشان می دهد عملیات تزریق باعث افزایش مقاومت شمعها شده است.
- نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت بدون تزریق و پس از تزریق هم در آزمایشگاه و هم در سایت دارای روند افزایشی مناسبی می باشد. هر چند سطح تنش در هر دو حالت یکسان می باشد اما در دستگاه FCV تزریق عملکرد بهتری را از خود نشان می دهد زیرا در آزمایشگاه کنترل بهتری در عمل تزریق صورت گرفته است.

## مراجع

- [1] Perlow JM.; "Helical Pile Acceptance Criteria, Design Guidelines, and Load Test Verification"; Geo-Frontiers Adv. Geotech. Eng., (2011) p 94–102
- [2] Abdelghany Y. and El Naggar M.; " Full-Scale Field Investigations and Numerical Analyses of Innovative Seismic Composite Fiber-Reinforced Polymer and Reinforced Grouted Helical Screw Instrumented Piles Under Axial and Lateral Monotonic and Cyclic Loadings"; Adv. Soil Dyn. Found. Eng., (2014) p. 414–24. doi:10.1061/9780784413425.042.

- [3] Tsuha CHC., Aoki N., Rault G., Thorel L. and Garnier J., "Evaluation of the efficiencies of helical anchor plates in sand by centrifuge model tests"; *Can Geotech J* (2012) 49:1102–14. doi:10.1139/t2012-064.
- [4] Cerato AB. and Victor R.; "Effects of Long-Term Dynamic Loading and Fluctuating Water Table on Helical Anchor Performance for Small Wind Tower Foundations"; *J Perform Constr Facil* (2009) 23:251–61. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000013.
- [5] Vesic, A.S.; "Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom"; *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 97(SM 9), (1971)1183-1205.
- [6] Mitsch, M.P., and Clemence, S.P;" The Uplift capacity of helix anchors in sand, Uplift behavior of anchor foundations in soil",In *Proceedings of ASCE, New York, NY., (1985) pp. 26-47*
- [7] Das, B.M; " Earth anchors", Elsevier(1990), Amsterdam.
- [8] Perko HA.;"Helical Piles, A Practical Guide to Design and Installation"; Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, INC (2009)
- [9] Sakr M.; "High Capacity Helical Piles – A New Dimension For Bridge Foundations"; *Proc. 8th Int. Conf. Short Mediu. Span Bridg., Niagara Falls, Canada (2010).*
- [10] M.A.Fattah, A.Eslami and A.Fahimifar; "Direct CPT and CPTu methods for determining bearing capacity of helical piles"; *Marine Georesources & Geotechnology Journal*, doi:10.1080/1064119,(2016)1133741
- [11] Sprince, A. and Pakrastinsh, L. "Helical Pile Behavior and Load Transfer Mechanism in Different Soils" *The 10th. International Conference, May 19-21, (2010).*
- [12] Vickars R, Clemence S.;"Performance of Helical Piles with Grouted Shafts"; *New Technol. Des. Dev. Deep Found., (2000) p. 327–41.*
- [13] American Society for Testing and Materials.;"Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load"; *ASTM D1143 / D1143M - 07. Annu B ASTM Stand (2013) 04.08.* doi:10.1520/D1143\_D1143M.
- [14] CFEM; "Canadian Foundation Engineering Manual"; 1th Edition Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, BiTech Publishers Ltd., Richmond, EC(2006).