



بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری مهار مارپیچ در ماسه

فرزاد قریب^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد تمام گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

مشهد، مشهد، ایران

eseyedi@um.ac.ir

چکیده

امروزه با افزایش کاربرد فولاد، استفاده از شمع‌های فولادی نظیر شمع پیچی حلزونی نیز افزایش یافته است. شمع‌های پیچی حلزونی در کشش (مهار مارپیچ) دارای کاربردهای فراوان نظیر: مهاربندی سازه‌ها، فونداسیون سازه‌های سبک یا موقت، مهار دیوارهای حائل و سازه‌های زیرزمینی، مهار برای پایداری سکوها و دریایی و نیروگاه‌های خورشیدی و بادی می‌باشد. همچنین مهار مارپیچ دارای مزایای: نصب سریع و آسان بدون نیاز به حفاری زیاد، کنترل ظرفیت باربری با گشتاور نصب، قابلیت نصب در محیط شهری (عدم لرزش و صدای زیاد هنگام نصب) و عدم آلودگی زیست محیطی و ... می‌باشد. در این پژوهش ظرفیت باربری آزمایشگاهی (کوچک مقیاس) مهار در ماسه فیروزکوه مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین تاثیر تعداد صفحه (۱، ۲ و ۳) و شکل صفحه‌ها (دایره، مربع، شش ضلعی یا مساحت یکسان) بر ظرفیت باری کششی مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انجام آزمون‌ها مشاهده شده است که شکل صفحه‌ها تاثیر زیادی در ظرفیت مهار دارد به طوری که صفحه با شکل شش ضلعی بیشترین و صفحه دایروی کمترین ظرفیت کششی را دارد. همچنین همواره افزایش تعداد صفحه‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری نمی‌شود و به عوامل دیگر نظیر شکل صفحه‌ها، عمق مدفون، فاصله بین صفحه‌ها و ... بستگی دارد.

کلمات کلیدی: ظرفیت باربری کششی، مهار مارپیچ، شکل صفحه، مطالعه آزمایشگاهی، شمع پیچی حلزونی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، شمع‌های پیچی-حلزونی به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های مقاوم‌سازی و مهاربندی در برابر نیروهای کششی، به ویژه در پروژه‌های ژئوتکنیکی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این شمع‌ها متشکل از یک میله یا بدنه‌ای استوانه‌ای و یک یا چند صفحه باربر هستند که صفحات مذکور به صورت عمود بر محور طولی شمع متصل می‌شوند. فرآیند نصب شمع از طریق اعمال گشتاور به سر آن انجام می‌پذیرد، به گونه‌ای که با چرخاندن بدنه درون خاک، صفحات مارپیچی با جابه‌جایی جانبی خاک، در عمق زمین نفوذ کرده و استقرار می‌یابند. بدنه‌ای استوانه‌ای می‌تواند به صورت مشبک طراحی شود تا امکان تزریق دوغاب یا سایر مواد تقویتی از درون آن فراهم گردد، که این امر منجر به افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری کششی شمع می‌شود. بار کششی وارد بر شمع پیچی-حلزونی از طریق مؤلفه‌های مختلفی نظیر اصطکاک جداره، مقاومت صفحات مارپیچ و باند تزریقی اطراف شمع منتقل و تحمل می‌گردد.

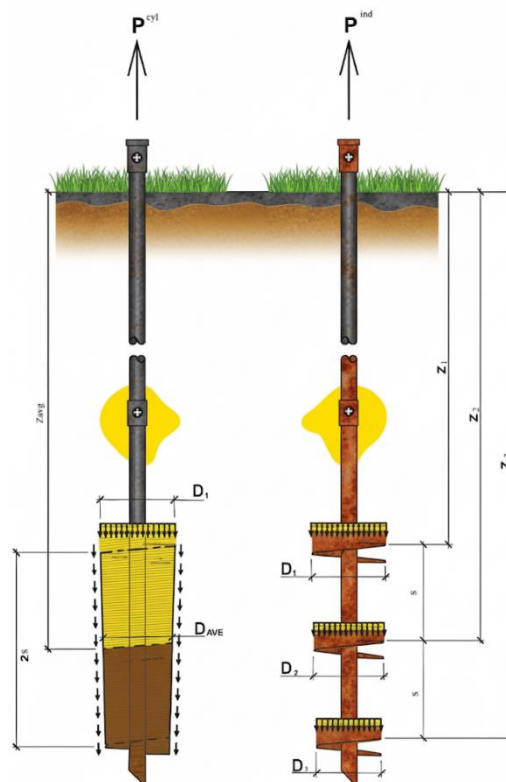
منفرد و آشتیانی [۱] به مطالعه آزمایشگاهی شمع و گروه شمع پیچی حلزونی پرداخته‌اند. و تاثیر عواملی همچون قطر مارپیچ، عمق مدفون شدن، فاصله بین مهارها و چگالی نسبی خاک (۶۰٪ و ۸۵٪) بر ماسه‌ی مرطوب را ارزیابی کرده‌اند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش قطر مارپیچ و عمق بیشتر مهار، ظرفیت کششی مهارها را بهبود می‌دهد. همچنین فاصله بهینه شمع‌ها از یکدیگر را برای گروه شمع بدست آورده‌اند.

اسماعیل زاده و اسلامی [۲] به مطالعه آزمایشگاهی شمع پیچی حزونی با تعداد صفحه متفاوت در کشش و فشار در دستگاه FCV پرداختند. در این مقاله آن‌ها به تاثیر تغییر قطر صفحه بالایی با ثابت ماندن صفحه پایینی، تزریق پس از نصب و شفت مخروطی در ماسه پرداخته‌اند. پس از انجام آزمون مشاهده کردند که افزایش تعداد مارپیچ‌ها و نسبت فاصله، ظرفیت فشاری را افزایش داده اما ظرفیت کششی را کاهش داده است و شمع‌های پس تزریق شده عملکرد کششی بسیار بهتری نسبت به شمع‌های بدون تزریق داشته‌اند.

شایان ذکر است که در اغلب مطالعات پیشین، شکل هندسی صفحات باربر به صورت دایره‌ای در نظر گرفته شده است، در حالی که تنها در تعداد محدودی از پژوهش‌ها به بررسی صفحات با هندسه غیردایره‌ای، نظیر مربعی، پرداخته شده است. این در حالی است که هندسه صفحات می‌تواند تأثیر به سزایی بر عملکرد مکانیکی شمع، از جمله ظرفیت باربری، داشته باشد. علاوه بر این، بهینه‌سازی هندسه صفحات می‌تواند در کاهش مصرف مصالح و هزینه‌های ساخت نیز مؤثر واقع شود.

۲- نظریه ظرفیت باربری کششی شمع مارپیچ

برای تعیین ظرفیت باربری کششی شمع مارپیچ، از تعریف دو نظریه مختلف شامل صفحات باربر مجزا و استوانه برشی مجازی استفاده می‌شود. شمای کلی این دو نظریه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- ظرفیت باربری کششی شمع مارپیچ با دو نظریه مختلف

در نظریه اول، فرض می‌شود صفحات باربر بطور مجزا عمل کرده و ظرفیت باربری کششی (P_u^{ind}) مطابق رابطه (۱) برابر با مجموع ظرفیت هر یک از صفحات است:

$$P_u^{ind} = \sum_n q_{ult_n} A_n \quad (1)$$

که در آن، A_n ، سطح مقطع و q_{ult_n} فشار قابل تحمل وارد بر صفحه n ام است.

در نظریه دوم که به روش استوانه برشی معروف است، فرض می‌شود خاک میان صفحه‌ها به عنوان یک جسم صلب عمل کرده و سطح اصطکاک میان این استوانه مجازی با خاک اطراف به همراه ظرفیت باربری بالاترین صفحه، به عنوان ظرفیت باربری کششی شمع (P_u^{cyl}) مطابق رابطه (۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$P_u^{cyl} = q_{ult} \cdot A_T + T \cdot P_{plate} \quad (2)$$

که در آن، A_T سطح مقطع بالاترین صفحه، P_{plate} محیط صفحه، T مقاومت برشی خاک در جدار استوانه است.

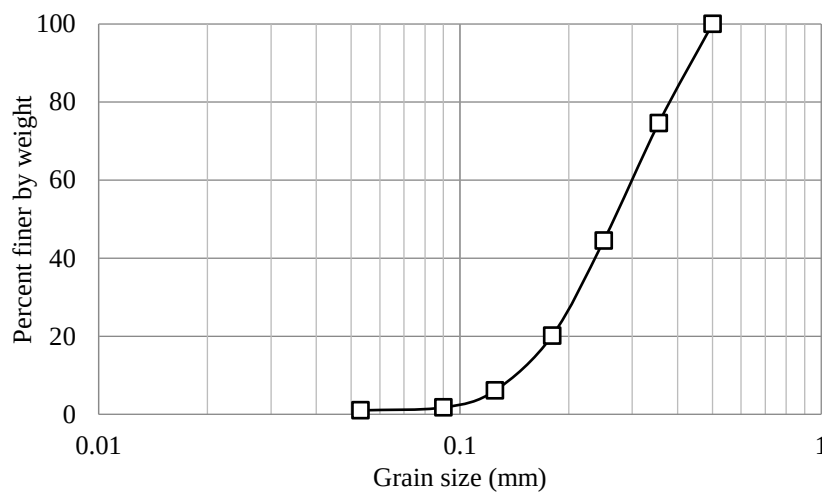
ظرفیت باربری کششی نهایی شمع مارپیچ برابر با کمترین نیروی حاصل از این دو نظریه طبق رابطه (۳) تلقی می‌شود:

$$P_u = \min\{P_u^{ind}, P_u^{cyl}\} \quad (3)$$

۳- مصالح و طراحی آزمون‌ها

۳-۱- مشخصات مصالح خاکی

خاک مورد استفاده در این پژوهش، ماسه فیروزکوه با نام تجاری «ماسه ۱۶۱ فیروزکوه» بوده است. مشخصات فیزیکی این خاک از طریق انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده است. دانه‌بندی خاک بر اساس استاندارد ASTM D422[3]، چگالی ویژه ذرات جامد (G_s) مطابق استاندارد ASTM D854[4] و چگالی توده‌ای خاک بر اساس استاندارد ASTM D4254[5] تعیین شده است. شکل (۲) منحنی دانه‌بندی ماسه را نشان می‌دهد و خلاصه‌ای از مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) آمده است.



شکل ۲ - منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه ۱۶۱

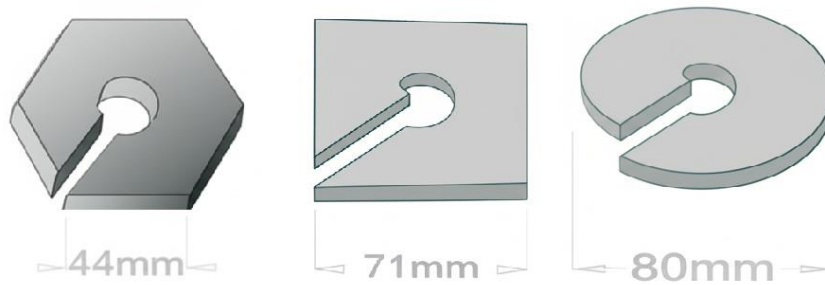
جدول ۱- پارامترهای فیزیکی خاک

D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	γ_d^{min} (kN/m^3)	γ_d^{max} (kN/m^3)	G_s
0.3	0.22	0.15	2	1.1	0.943	0.603	13.7	16.6	2.66

بر اساس نتایج جدول (۱)، این ماسه در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها (USCS)، در رده ماسه بدانه‌بندی‌شده (SP) قرار می‌گیرد. به‌منظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک، از آزمایش برش مستقیم با ابعاد نمونه ۱۰۰ میلی‌متر و مطابق با استاندارد ASTM D3080[6] استفاده شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک داخلی ماسه در حالت قله برابر با ۳۸/۵ درجه و در حالت باقیمانده برابر با ۳۶ درجه می‌باشد.

۳-۲- طراحی و ساخت شمع‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، صفحات مارپیچ شمع‌ها نقش اصلی در انتقال بار و عملکرد باربری را ایفا می‌کنند. در این پژوهش، سه نوع هندسه متفاوت برای صفحات باربر مورد بررسی قرار گرفته است: دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی منظم. وجه مشترک تمامی این صفحات، برابری مساحت تصویر افقی آن‌ها با مساحت یک دایره به قطر ۸۰ میلی‌متر (معادل ۵۰۰۰ میلی‌متر مربع) است؛ به‌طوری که تمامی صفحات از نظر سطح مؤثر باربر یکسان در نظر گرفته شده‌اند. هندسه و ابعاد دقیق این صفحات در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳- هندسه متفاوت صفحه‌های با سطح مقطع یکسان

در این پژوهش، علاوه بر بررسی تأثیر هندسه صفحات باربر، تعداد صفحات نیز به عنوان یک پارامتر متغیر در نظر گرفته شده است. برای هر یک از هندسه‌های مورد بررسی (دایره‌ای، مربعی و شش ضلعی)، شمع‌هایی با یک، دو و سه صفحه ساخته شده‌اند. فاصله بین صفحات در کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۲۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین، گام مارپیچ (فاصله بازشدگی صفحات) برابر با ۲۷ میلی‌متر انتخاب شده است.

قطر بدنه‌ی مرکزی تمامی شمع‌ها ۱۶ میلی‌متر بوده و از میلگرد ساده بدون آج استفاده شده است. لازم به ذکر است که فاصله بین صفحات حداقل برابر با سه برابر قطر صفحه لحاظ شده تا از تداخل عملکرد صفحات (اثر سایه اندازی) و کاهش کارایی باربری جلوگیری شود. این معیار توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی مختلف تایید شده است [7, 8]. به منظور اطمینان از عملکرد مؤثر صفحات به صورت مدفون (Deep Helix Action)، عمق قرارگیری بالاترین صفحه به گونه‌ای انتخاب شده است که باربری آن تحت تأثیر شرایط سطحی قرار نگیرد. مطابق با پیشنهاد میچ و کلمانس [۹]، حداقل عمق مدفون صفحه باید برابر با پنج برابر قطر آن باشد.

ابعاد و مشخصات هندسی اجزای شمع‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با آیین‌نامه AC308 [10] مطابقت داشته باشند. با در نظر گرفتن یک ضریب مقیاس ۲/۷۵، شمع‌های آزمایشگاهی این تحقیق معادل شمع‌هایی با قطر ۲۰۰ میلی‌متر، فاصله صفحات ۶۶۰ میلی‌متر و گام مارپیچ ۷۵ میلی‌متر در مقیاس واقعی می‌باشند.

تمام اجزای شمع‌ها از فولاد St37 ساخته شده‌اند. برای تولید صفحات شمع، ابتدا ورق‌های فولادی با ضخامت ۸ میلی‌متر به اشکال دایره‌ای، مربعی و شش ضلعی برش داده می‌شوند. سپس، با استفاده از فرایند گرمادهی در کوره آهنگری و اعمال ضربه‌های مکانیکی، بازشدگی بین دو لبه صفحات ایجاد می‌گردد. در نهایت، صفحات ساخته شده به میلگرد مرکزی با استفاده از جوشکاری متصل می‌شوند.

۳-۳- مخزن و سیستم بارگذاری

مخزن مورد استفاده در این پژوهش به شکل استوانه‌ای با قطر و ارتفاع یک متر طراحی شده است. در تعیین ابعاد مخزن، به گونه‌ای عمل شده که تأثیری بر ظرفیت باربری شمع‌ها نداشته باشد. بر اساس نظریه مطرح شده توسط میچ و کلمانس [۹]، هنگامی که نسبت عمق مدفون بالاترین صفحه به قطر آن بزرگ‌تر از پنج باشد، گسیختگی در حالت عمیق رخ می‌دهد؛ بنابراین، عمق پایین‌ترین صفحه از سطح خاک برابر با ۰/۹ متر انتخاب شده است.

علاوه بر این، مطابق با نظریه قالی و هانا [۱۱]، زاویه سطح گسیختگی که از لبه صفحه عبور می‌کند و با امتداد قائم زاویه می‌سازد، حداکثر دو سوم زاویه اصطکاک داخلی خاک است. با در نظر گرفتن زاویه اصطکاک داخلی قله خاک، قطر گوه گسیختگی در سطح مخزن برابر با ۴۸۰ میلی‌متر محاسبه شده است که این مقدار در مقایسه با قطر مخزن (یک متر) کوچک‌تر بوده و با توجه به عدم برخورد با جدار مخزن، تأثیری بر ظرفیت باربری شمع ندارد.

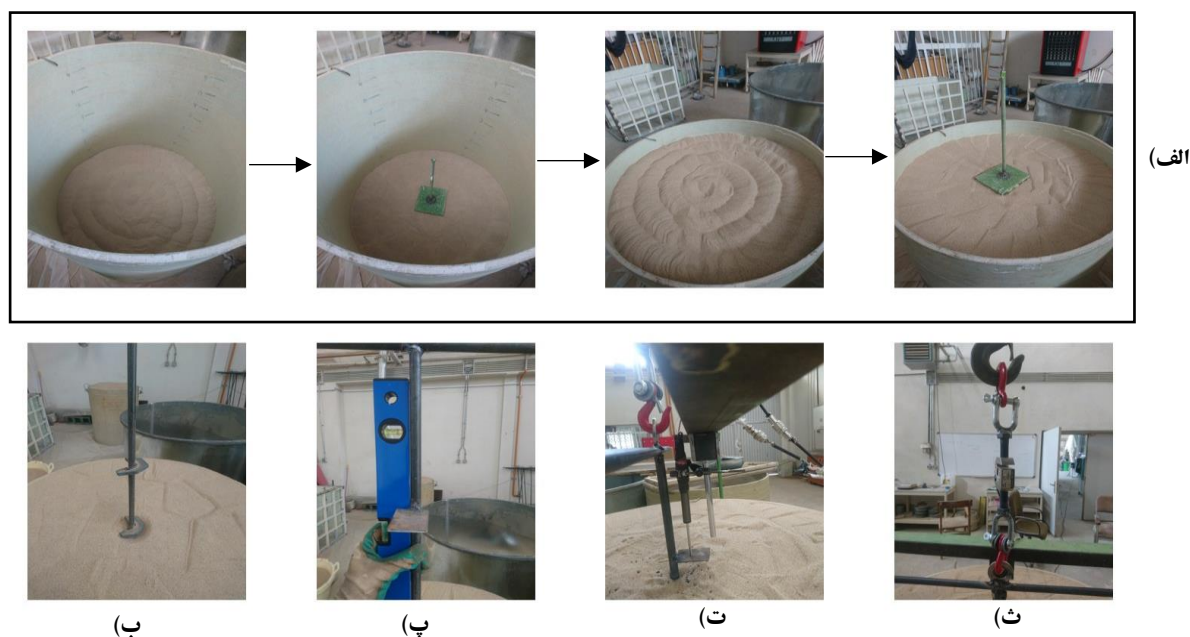
۴- روش انجام آزمون‌ها

در این پژوهش، در مجموع ۱۸ آزمون انجام شده است. ابتدا، مخزن به صورت لایه‌ای پر می‌شود و شمع مارپیچی در مرکز مخزن نصب می‌گردد. سپس، نیروسنج و جابجایی‌سنج به نوک شمع متصل شده و شمع تحت بارگذاری کششی قرار می‌گیرد. مقادیر نیرو و جابجایی توسط نیروسنج و جابجایی‌سنج به دیتالاگر و سپس به رایانه منتقل و ذخیره می‌شود.

مصالخ خاک داخل مخزن به صورت لایه‌ای و با ارتفاع ۰/۲ متر از طریق بارش حلقوی ریخته می‌شود (شکل ۴. الف). پس از هر بار بارش، لایه خاکی توسط کوبه فلزی (شکل ۴. الف) و با کنترل ضخامت، متراکم می‌گردد. با این روش، تراکم نسبی لایه‌ها در بازه ۴۲ تا ۴۶ درصد و وزن مخصوص بین ۱۴/۷ تا ۱۴/۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب به دست آمد که به طور متوسط معادل ۴۴ درصد تراکم نسبی با خطای نسبی ۲ درصد است.

در مرحله بعد، شمع ماریچی با اعمال گشتاور از طریق دستگاه تعبیه شده در سر آن، در مرکز مخزن نصب می‌شود (شکل ۴. ب). برای کاهش اختلالات و افزایش دقت اجرای شمع، سرعت چرخش به آرامی و معادل هشت دور در دقیقه تنظیم شده است. همچنین، تراز بودن شمع نسبت به قائم (شکل ۴. پ) همواره با ترازسنج کنترل می‌شود.

ابزارهای اندازه‌گیری بر اساس استاندارد [12] ASTM D3689 انتخاب شده‌اند. برای ثبت تغییر مکان از دستگاه LVDT با دامنه حرکتی ۱۶۰ میلی‌متر و دقت ۰/۱۵ میلی‌متر استفاده شده (شکل ۴. ت) و برای اندازه‌گیری نیرو، نیروسنج نوع S ساخت شرکت SEWHA با ظرفیت ۲ تن و خطای جمععی ۰/۰۳ درصد به کار گرفته شده است (شکل ۴. ث).



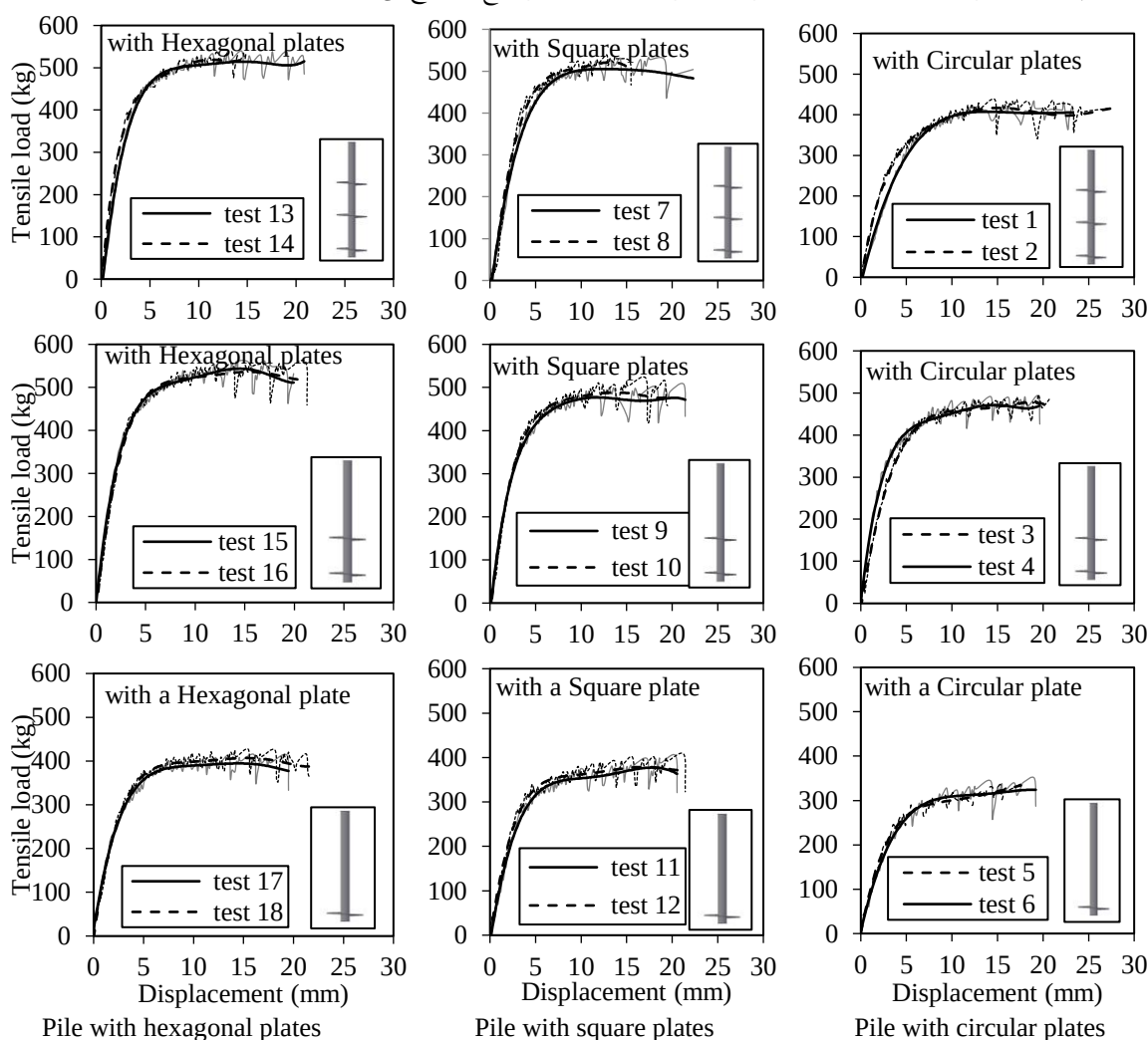
شکل ۴- نمایش مراحل انجام آزمایش. الف) پر کردن مخزن. ب) شمع در حال نصب. پ) کنترل تراز بودن شمع داخل خاک حین نصب. ت) نصب جایجایی سنس. ث) نصب نیروسنج.

آزمون بارگذاری استاتیکی شمع در کشش مطابق با استاندارد [12] ASTM D3689 و به روش سریع انجام شده است. در این روش که مبتنی بر کنترل نیرو است، بار وارد بر شمع به صورت پله‌ای اعمال می‌شود، به طوری که هر مرحله بارگذاری معادل پنج درصد از بار گسیختگی پیش‌بینی شده می‌باشد. هر مرحله بارگذاری باید در بازه زمانی بین چهار تا پانزده دقیقه به صورت ثابت نگه داشته شود. فرایند بارگذاری تا زمان رسیدن به نقطه گسیختگی یا ظرفیت ایمن تجهیزات آزمون (شامل شمع یا دستگاه‌های اعمال بار) ادامه می‌یابد. در هر مرحله، با ثابت بودن مقدار نیرو، تغییر مکان انتهایی سر شمع اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. شایان ذکر است که آزمون بارگذاری برای کلیه نمونه‌های شمع با هندسه‌های صفحه مربعی، دایره‌ای و شش ضلعی و همچنین با تعداد صفحات یک، دو و سه بار انجام شده است. به منظور اطمینان از صحت و تکرارپذیری نتایج، هر آزمون حداقل دو بار تکرار شده است.

۵- ارائه نتایج و تفسیر

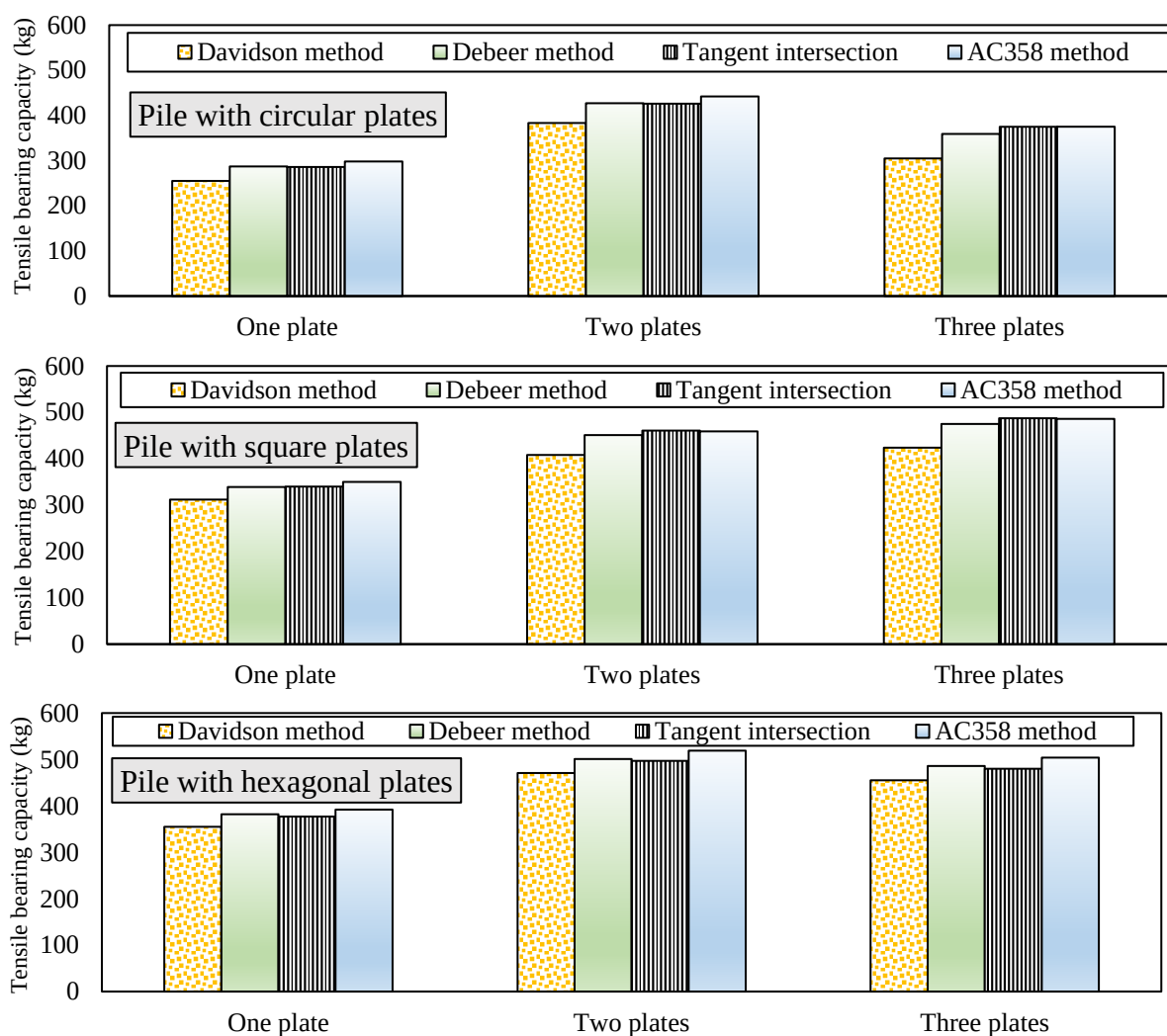
۵-۱- ظرفیت باربری کششی

نمودار تغییرات بار کششی وارد بر شمع در مقابل جابجایی سر شمع برای تمامی نمونه‌ها با یک، دو و سه صفحه و با هندسه‌های دایره‌ای، مربعی و شش ضلعی در شکل (۵) ارائه شده است. در این شکل، برای هر نمونه دو آزمون تکرار شده است تا تکرارپذیری نتایج بررسی گردد. با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که آزمون‌های بارگذاری شمع‌ها از نظر تکرارپذیری قابل قبول هستند. به دلیل وجود نوسانات در داده‌های ثبت شده، نمودارها پس از صاف‌سازی به صورت پرننگ نمایش داده شده‌اند. در ادامه، روش‌های تعیین ظرفیت باربری این شمع‌ها تشریح می‌شود.



شکل ۵- نمودار نیروی کششی در مقابل تغییر مکان شمع‌ها برای شکل‌های مختلف صفحه‌ها

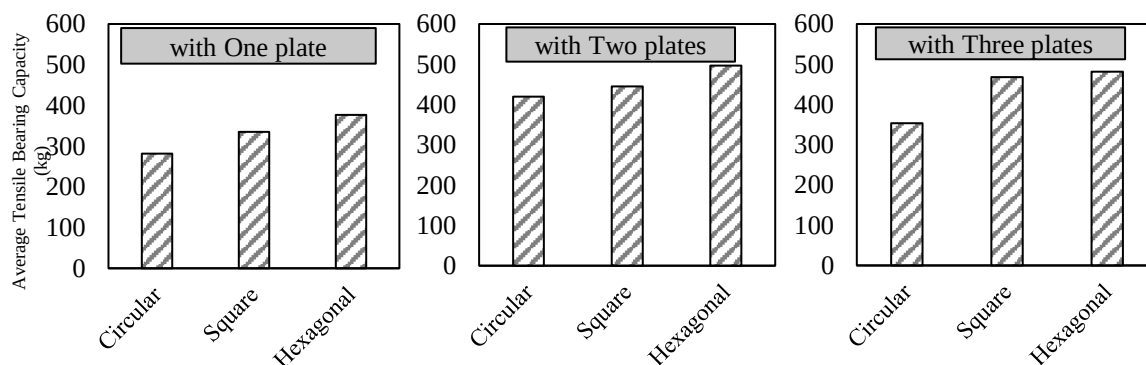
در ادبیات فنی، روش‌های متعددی برای تعیین ظرفیت باربری کششی شمع‌ها بر اساس نمودار نیرو-جابجایی معرفی شده است. ساده‌ترین روش، تعیین ظرفیت باربری برابر با مقدار بار در نقطه مجانب نمودار در تغییر مکان‌های بزرگ است. اما این روش ممکن است به تغییر شکل‌های بزرگی نیاز داشته باشد (مانند حالت بیرون کشیدگی شمع) یا نمودار اصلاً به این حالت نرسد، بنابراین در مهندسی کاربرد محدودی دارد. در این پژوهش، چهار روش شناخته شده شامل روش دبیر [۱۳]، تقاطع مماس‌ها [۱۴]، روش دیویسون [۱۵] و روش بار معادل ده درصد قطر شمع مطابق آیین‌نامه [10] AC358 به کار گرفته شده‌اند. نتایج به دست آمده از این چهار روش در شکل (۶) نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد اگرچه تفاوت‌هایی میان روش‌ها وجود دارد، اما ظرفیت باربری تعیین شده برای هر گروه از شمع‌ها به میزان قابل توجهی به هم نزدیک است. به طور کلی، روش دیویسون کمترین ظرفیت باربری و روش مبتنی بر تغییر مکان مطابق با AC358 بیشترین ظرفیت باربری را گزارش کرده است.



شکل ۶- ظرفیت باربری محاسبه شده با روشهای شکل مختلف.

۵-۲- تأثیر شکل صفحه‌ها

برای ارزیابی تأثیر شکل صفحات بر ظرفیت باربری کششی، شم‌های دارای صفحات دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی با تعداد صفحات مشابه در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی موارد، شم‌هایی با صفحات شش‌ضلعی بیشترین ظرفیت باربری و شم‌هایی با صفحات دایره‌ای کمترین ظرفیت باربری را دارا هستند.



شکل ۷- مقایسه ظرفیت باربری کششی متوسط انواع شم‌ها با هندسه‌های مختلف صفحه

جهت تحلیل دقیق‌تر تأثیر شکل صفحات بر ظرفیت باربری کششی، تمرکز بر نتایج شمع‌های تک‌صفحه است. لازم به ذکر است که این سه شمع در عمق مدفون یکسانی (۰.۹ متر) قرار دارند. با توجه به ابعاد صفحات، نسبت عمق مدفون به عرض صفحه برای صفحات دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی به ترتیب برابر با ۱۱/۲۵، ۱۲/۷ و ۱۰/۲ است. بر اساس مطالعات میرهوف و آدامس [۱۶]، ضریب باربری برای نسبت عمق به عرض بزرگ‌تر از حدود هفت، در خاک‌های متراکم (با زاویه اصطکاک داخلی $\phi = 40^\circ$ درجه که نزدیک به مشخصات خاک این پژوهش است) ثابت باقی می‌ماند، که این شرط برای تمامی شمع‌های این پژوهش نیز برقرار است.

با توجه به کوچک بودن سطح مقطع لوله و همچنین، با در نظر گرفتن خاک ماسه (خاک غیرچسبنده)، مقدار q_{ult} هر صفحه برابر با $q_{ult} = \gamma z N_q^*$ است که در آن، γ وزن مخصوص خاک، z عمق مدفون صفحه و N_q^* ضریب ظرفیت باربری خاک است. در ادبیات فنی، N_q^* با عنوان ضریب رهاشدگی (Breakout factor) نیز نام گذاری شده است. مقدار ضریب باربری مهار با هندسه دیگر مثل صفحه مربعی، با یک ضریب به نام اثر شکل (α)، بصورت رابطه (۴) قابل تعریف است:

$$\alpha = \frac{N_q^*}{N_{q_{circle}}^*} \quad (۴)$$

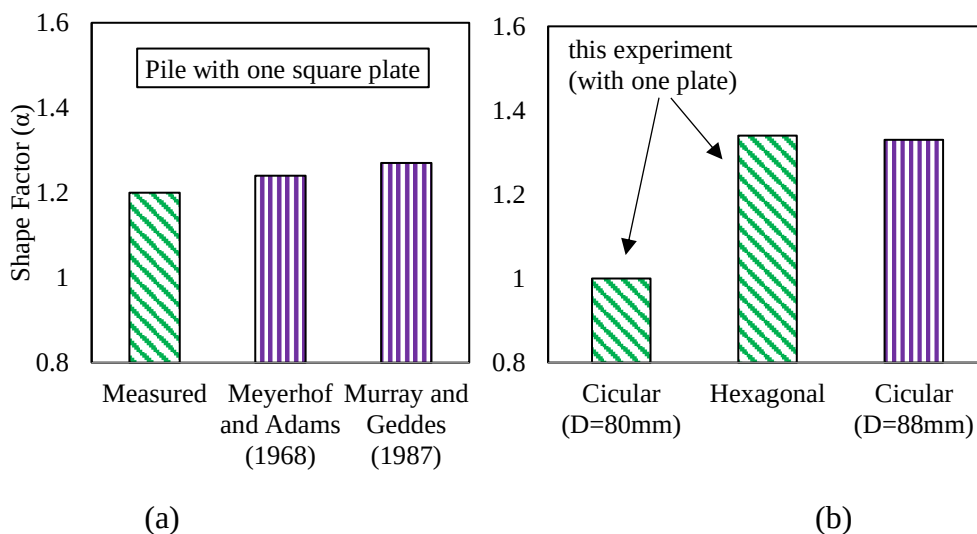
از آنجا که سطح مقطع تمام صفحات برابر است، ضریب شکل برای شمع‌های تک‌صفحه مربعی و شش‌ضلعی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha = \frac{N_q^*}{N_{q_{circle}}^*} = \frac{N_q^*(\gamma z)}{N_{q_{circle}}^*(\gamma z)} = \frac{P_u}{P_{u_{circle}}} \quad (۵)$$

مقادیر ضریب شکل برای شمع‌های تک‌صفحه در شکل (۸) ارائه شده است. در شکل (۸ الف)، مقدار این ضریب برای شمع با صفحه مربعی همراه با مقادیر ارائه شده توسط میرهوف و آدامس [۱۶] و موری و گدس [۱۷] برای نسبت عمق به عرض صفحه بزرگ‌تر از ۱۰ به منظور مقایسه نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که ضریب شکل در این دو مرجع بر اساس روابط تحلیلی و نظری محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب شکل حاصل از این پژوهش ($\alpha = 1.2$) با مقادیر نظری ارائه شده (۱.۲۷ و ۱.۲۴) تطابق خوبی دارد.

با توجه به روش تحلیلی به کار رفته در این نظریه‌ها، به نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن ظرفیت باربری صفحه مربعی نسبت به صفحه دایره‌ای، گسترده‌تر بودن ناحیه خاک درگیر بالای صفحه مربعی باشد. برای درک بهتر این موضوع، لازم به ذکر است که با وجود برابر بودن مساحت صفحات مربعی و دایره‌ای، محیط صفحه مربعی بزرگ‌تر است و بنابراین وزن بیشتری از گوه خاک روی صفحه وارد می‌شود که باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد.

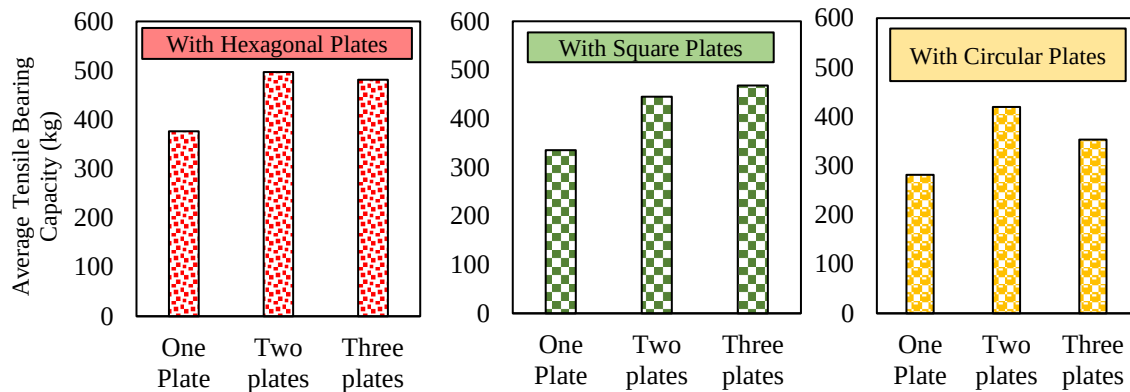
در شکل (۸ ب)، ضریب شکل برای شمع با صفحه شش‌ضلعی نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، ضریب شکل برابر با $\alpha = 1.34$ به دست آمده که بالاتر از مقدار صفحه مربعی است. همچنین در این شکل، ضریب شکل محاسبه شده برای دایره محیطی این صفحه شش‌ضلعی (با قطر ۸۸ میلی‌متر) بر اساس روش ویسارت و کلمانس [۱۸] ($\alpha = 1.33$) نیز ارائه شده است. مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد، به طوری که صفحه شش‌ضلعی رفتاری مشابه یک صفحه دایره‌ای مدفون با قطر بزرگ‌تر از خود نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمایش ضریب شکل پره. الف) مقایسه برای صفحه مربعی با دیگر پژوهش‌ها. ب) مقایسه برای صفحه شش‌ضلعی با صفحه دایره‌ای

۵-۳- تأثیر تعداد صفحه‌ها

در شکل (۹) ظرفیت باربری شمع‌های دارای صفحات دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی را در سه دسته مختلف بر اساس تعداد صفحات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود شمع‌های با صفحات شش‌ضلعی رفتاری مشابه شمع‌های دارای صفحات دایره‌ای از خود نشان می‌دهند؛ به طوری که در هر دو حالت، شمع‌های دو صفحه بیشترین ظرفیت باربری را دارند. در مقابل، این روند در شمع‌های دارای صفحات مربعی متفاوت است و ظرفیت باربری شمع با سه صفحه از شمع با دو صفحه بیشتر است.



شکل ۹- نمایش تأثیر تعداد پره‌ها با هندسه مختلف بر ظرفیت باربری کششی شمع‌ها

برای تبیین این رفتار، پیش‌تر به شباهت عملکرد شمع تک‌صفحه شش‌ضلعی با صفحه دایره‌ای اشاره شده بود. همچنین، با توجه به حاکمیت مکانیزم استوانه برشی در ظرفیت باربری، محیط صفحه نقش مهمی در تعیین ظرفیت باربری ایفا می‌کند. یادآوری می‌شود محیط صفحات دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی به ترتیب برابر با ۲۵۱، ۲۸۴ و ۲۶۴ میلی‌متر است. عامل مؤثر دیگر در تفاوت رفتار، ضریب شکل صفحه بالایی است که در بخش قبلی به آن اشاره شد. به طور خلاصه، افزایش تعداد صفحات لزوماً منجر به افزایش ظرفیت باربری کششی شمع نمی‌شود و این رابطه به هندسه صفحات و ویژگی‌های خاک بستگی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر شکل و تعداد صفحات باربر بر ظرفیت باربری کششی شمع‌های مارپیچی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. سه دسته شمع مارپیچ با صفحات دایره‌ای، مربعی و شش‌ضلعی و در تعداد صفحات یک، دو و سه تایی طراحی و ساخته شدند. هندسه شمع‌ها و اجزا به گونه‌ای انتخاب شد که صفحات به صورت عمیق مدفون شده و عملکرد آن‌ها مستقل از عمق قرارگیری باشد. خاک مورد استفاده، ماسه با تراکم نسبی یکنواخت (۴۴ درصد) بود. همچنین در این پژوهش به دلیل در دسترس نبودن گشتاور سنج، رابطه میان گشتاور نصب و ظرفیت باربری برای هندسه‌های متفاوت بررسی نشده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش استوانه برشی، نتایج دقیق‌تر و تطابق بهتری با واقعیت ارائه می‌دهد.

با قرار دادن صفحه دایره‌ای به عنوان شاخص، ضریب شکل برای صفحات مربعی و شش‌ضلعی به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱/۳۴ محاسبه شد این ضرایب نشان‌دهنده این هستند که صفحات غیردایره‌ای می‌توانند ظرفیت باربری بالاتری داشته باشند، چون سطح محیطی بیشترشان، مقاومت برشی بیشتری را در خاک فعال می‌کند. اما برای تراکم‌های نسبی متفاوت (مثلاً ۹۰ درصد) به دلیل تأثیر بیشتر دستخوردگی حین نصب نیازمند تحقیقات بیشتری است. برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچ با صفحه شش‌ضلعی، می‌توان از روابط مربوط به شمع‌های با صفحه دایره‌ای استفاده کرد، به این صورت که صفحه شش‌ضلعی به صورت یک دایره محیطی معادل مدل‌سازی شود. این رویکرد یک ساده‌سازی رایج در مهندسی است که امکان بهره‌برداری از فرمول‌ها و نمودارهای موجود برای صفحات دایره‌ای را فراهم می‌آورد، هرچند که یک تقریب است.

افزایش تعداد صفحات در شمع مارپیچ، لزوماً منجر به افزایش ظرفیت باربری کششی نمی‌شود و بسته به هندسه صفحات، ممکن است تأثیر افزایش یا کاهش داشته باشد. در واقع، این تأثیر می‌تواند بسته به هندسه صفحات و فاصله آن‌ها از یکدیگر، افزایشی یا حتی کاهشی باشد. دلایل این امر شامل تداخل بین صفحات (اثر سایه‌اندازی)، بهم‌ریختگی بیش از حد خاک در حین نصب، و محدودیت‌های مربوط به گشتاور نصب است. بنابراین، طراحی بهینه نیازمند تعادلی بین تعداد، قطر و فاصله صفحات برای دستیابی به حداکثر کارایی و ظرفیت است.



۷- مراجع

- [۱] Monfared Niaki, S.S. and M. Ashtiani, Experimental Study on Tensile Bearing Capacity of Single and Group Helical Anchors. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024: p. 1-15.
- [۲] Esmailzade, M. and A. Eslami, Experimental study on performance and enhanced methods of helical piles using Frustum Confining Vessel in Anzali Sand. *Ocean Engineering*, 2025. 324: p. 120624.
- [۳] ASTM, D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils. 2007. ASTM International
- [۴] ASTM, D854: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM International, 2010.
- [۵] ASTM, D4254-00: Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, 2002.
- [۶] ASTM, D/۳۰۸۰D3080M—11 Direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, 2012: p. 1-9.
- [۷] Rao, S.N., Y. Prasad, and M.D. Shetty, The behaviour of model screw piles in cohesive soils. *Soils and Foundations*, 1991. 31(2): p. 35-50.
- [۸] Bassett, R.H., Underreamed ground anchors. *Revue Française de Géotechnique*, 1978(3): p. 11-17.
- [۹] Mitsch, M.P. and S.P. Clemence, Uplift capacity of helix anchors in sand. 1985, American Society of Civil Engineers (ASCE). p. 26-47.
- [۱۰] AC-358, Acceptance Criteria for helical foundation systems and devices. AC358. 2007.
- [۱۱] Ghaly, A. and A. Hanna, Stresses and strains around helical screw anchors in sand. *Soils and Foundations*, 1992. 32(4): p. 27-42.
- [۱۲] ASTM, D3689/D3689M – 07 Standard test methods for deep foundations under static axial tensile load. ASTM International, 2013.
- [۱۳] DeBeer, E., Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van het grandsdraagvermogen van zand onder funderinger op staal. *Tijdschrift der Openbar Verken van Belgie*, 1967 : (۶)p. 4-6.
- [۱۴] Housel, W.S., Pile load capacity: estimates and test results. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1966. 92(4): p. 1-30.
- [۱۵] Davidson, M.T., High capacity pile proceeding lecture series innovations in foundation construction .ASCE, 1972. Illinois section: p. 52.
- [۱۶] Meyerhof, G. and J. Adams, The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian geotechnical journal*, 1968. 5(4): p. 225-244.
- [۱۷] Murray, E. and J.D. Geddes, Uplift of anchor plates in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1987. 113(3): p. 202-215.
- [۱۸] Veesaert, C. and S. Clemence. Dynamic pullout resistance of anchors. in *Proc. The International Symposium on Soil-Structure Interaction*, Rourkee, India. 1977.



چهاردهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران

۲۹ مهر تا ۱ آبان ۱۴۰۴ - دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

گواهی ارائه مقاله

تاریخ: ۲۴ آبان ماه ۱۴۰۴

شماره: 14ICCE/ GE-21-076

بدین وسیله گواهی می‌شود مقاله‌ای با عنوان:

«بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری مهار ماریچ در ماسه»

نویسندگان: فرزاد قریب، سید احسان سیدی حسینی‌نیا

در چهاردهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، که در تاریخ ۲۹ مهر تا ۱ آبان ۱۴۰۴ در دانشگاه صنعتی شریف برگزار گردید، به صورت پوستری پذیرفته و ارائه شده است.



این‌الوانی
دبیر علمی چهاردهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران



عارصفانی
دبیر چهاردهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران