

Field investigation on the performance of different screw piles in sandy soils Case study: Bandar Anzali Coast - Anzali Port

Ebrahim Shojaei¹, Abolfazl Eslami^{2*}, Navid Ganjian³, Ramin Ezzatdust⁴

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- M. Sc., Graduate department of civil and environmental engineering -Coastal, Port and Marine Structure, Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran, Iran

ABSTRACT

Installation of traditional piles in urban and coastal environments has many challenges, such as the need for heavy drilling equipment and machinery, the lack of access, enforcement problems in soft and problematic soils and environmental problems such as vibration and noise pollutions. Meanwhile, according to the development of different hydraulic and mechanical equipment, new model of piles have been introduced which can be considered as a useful alternative to traditional piles. This model of piles bring the advantage of minimum executive problems such as less vibration and noise pollution and high speed installation procedure at low accessible areas. In the present study, using different hydraulic and electronic equipment, the behavior of the two models of conventional screw piles and a new innovated pile model were studied in Bandar Anzali with an embedment depth of 3.20 m. Also, a tubular steel pile was tested as the basis for comparing the behavior of driven piles with screw piles with the same dimensions and embedment depth. Overall, five compressive static loading tests were carried out on the implemented piles. The results indicated that this model of piles have an acceptable loading capacity and can be introduced as a suitable substitute for traditional piles in urban and coastal constructions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 August 2020

Revise Date: 19 April 2021

Accept Date: 03 September 2021

Keywords: Field investigation
Screw piles
Traditional piles
Performance
Bearing capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.243030.2211

*Corresponding author: Abolfazl Eslami.
Email address: afeslami@aut.ac.ir

بررسی میدانی عملکرد مدل شمع‌های مختلف پیچشی در خاک‌های ماسه‌ای مطالعه موردی - ساحل بندر انزلی

ابراهیم شجاعی^۱، ابوالفضل اسلامی^{۲*}، نوید گنجیان^۳، رامین عزت دوست^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- کارشناس ارشد سواحل، بندر و سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

اجرای شمع‌های سنتی در محیط‌های شهری و ساحلی دارای چالش‌های متعدد، نظیر نیاز به تجهیزات و ماشین‌آلات حفاری سنگین، صعوبت دسترسی و مشکلات اجرایی در خاک‌های نرم و مسئله دار و مشکلات زیست‌محیطی نظیر سروصدا، نویز و لرزش و ... می‌باشد. از طرفی با توجه به توسعه تجهیزات متعدد هیدرولیکی و مکانیکی، مدل شمع‌های جدیدی در سراسر دنیا جایگزین شمع‌های سنتی نظیر شمع‌های فولادی کوبشی و یا بتنی درجا شده است. این مدل از شمع‌ها با استفاده از نیروی گشتاور هیدرولیکی با حداقل مشکلات اجرایی نظیر، حداقل ارتعاش، آلودگی صوتی و با سرعت بسیار بالا قابلیت نصب در مناطق با دسترسی پایین را دارا می‌باشند. در تحقیق حاضر با استفاده از تجهیزات متعدد هیدرولیکی و الکترونیکی دو مدل از شمع‌های متداول پیچشی و یک مدل شمع ابداعی جدید در ساحل بندر انزلی به عمق استقرار ۳/۲۰ متر نصب و مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین یک شمع فولادی لوله‌ای به‌عنوان مبنای مقایسه رفتار شمع‌های کوبشی با شمع‌های پیچشی نیز با ابعاد و عمق استقرار مشابه مورد آزمایش قرار گرفت. در مجموع ۵ آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری بر روی شمع‌های اجرا شده انجام گرفت و نتایج بررسی‌ها نشان داد که این مدل از شمع‌ها در کلاس شمع‌های با ظرفیت کم تا متوسط از ظرفیت باربری قابل قبولی برخوردار بوده و می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای شمع‌های سنتی در ساخت‌وسازهای شهری و ساحلی مطرح گردند. همچنین شمع ابداعی خودبازشونده با ۶۰۰ نیوتن متر گشتاور نصب کمتر نسبت به شمع هلیکال و با ظرفیت باربری معادل با ۱۶۰ کیلونیوتن قابلیت بالای شمع ابداعی را مشخص نمود.

کلمات کلیدی: مطالعات میدانی، شمع‌های پیچشی، شمع‌های سنتی، بررسی عملکرد، ظرفیت باربری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.243030.2211	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.243030.2211	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۶/۱۲	۱۴۰۰/۶/۱۲	۱۴۰۰/۰۱/۳۰	۱۳۹۹/۵/۱۹
ابوالفضل اسلامی afeslami@aut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

شمع‌ها و یا پی‌های عمیق عناصر ستونی نسبتاً لاغری از جنس چوب، بتن، فولاد و یا سایر مصالح مرکب می‌باشند [۱] که به‌صورت قائم و یا کمی مایل در داخل خاک قرار گرفته و به‌عنوان رابط انتقال بار رو سازه به زیر سازه و لایه‌های مناسب خاک در اعماق پایین‌تر عمل می‌کنند. استفاده از شمع‌های سنتی نظیر شمع‌های فولادی کوبشی و یا شمع‌های بتنی درجا با روش‌های اجرای معمول و متداول همواره با محدودیت‌ها و مشکلات اجرایی فراوانی روبرو بوده است.

روش‌های اجرای شمع‌های درجا علیرغم محدودیت‌های خاص نیاز به تجهیزات سنگین در زمین‌های مسئله‌دار و ریزشی و همچنین سایت پلان‌های فراساحلی مشمول اثرات نامطلوب اجرا در کاهش ظرفیت باربری در جداره و کف شمع هستند. از جمله این اثرات می‌توان به دست‌خوردگی ناحیه کف شمع در اثر روش‌های حفاری و نیز آزادسازی تنش در کف و دیواره، واریزه‌ها و رسوبات نرمی که در کف چال ممکن است باقی بماند، غلاف گذاری و نیز استفاده از گل بنتونیت که می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری جدار شود اشاره کرد. هرچند می‌توان با اعمال نظارت دقیق و اجرای بهینه این‌گونه شمع‌ها اثرات نامطلوب اجرا را تا حدی کاهش داد؛ اما در بسیاری از موارد نمی‌توان آن‌ها را حذف کرد. روش‌های اجرای شمع‌های کوبشی نیز همواره با محدودیت‌های خاصی از جمله عدم امکان‌پذیری اجرا در مناطق شهری، ایجاد لرزش و سروصدا، ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در خاک در حین کوبش، محدودیت در قطر شمع در شرایط ژئوتکنیکی خاص و نیاز به تجهیزات و تأسیسات سنگین و . . . مواجه می‌باشند که در نهایت مجموع این مشکلات موجب مطرح‌شدن نوع جدیدی از شمع‌ها به نام شمع‌های پیچشی شده است که علاوه بر قابلیت نصب سریع توسط موتورهای هیدرولیکی، از مزایای متعددی نظیر، عملکرد مطلوب در برابر بارهای کششی و فشاری، قابلیت بهره‌برداری سریع در ساخت‌وسازهای ساحلی و فراساحلی، سازگاری با محیط‌زیست، عدم ایجاد لرزش و ارتعاش در حین اجرا و قابلیت بهره‌برداری در محیط‌های پرتراکم شهری برخوردار می‌باشند. این مدل شمع‌ها با توجه به نحوه نصب متمایزشان به شمع‌های پیچشی^۱ معروف می‌باشند. اولین ایده ساخت این مدل از شمع‌ها توسط میچل^۲ مهندس نابینای ایرلندی مطرح گردید و برای اولین بار در ساخت برج مراقبت دریاچه میلین^۳ در انگلستان در سال ۱۸۸۰ بکار گرفته شد [۲]. در سال‌های بعد به علت توسعه موتورهای هیدرولیکی قوی‌تر، دامنه بهره‌برداری از این مدل شمع‌ها گسترده‌تر گردید.

تا مدت‌ها تصور بر این بود که این نوع شمع‌ها مخصوص خاک‌های ریزدانه بوده و به دلیل کوچکی قطرشان در سنگریزه‌ها و زمین‌های درشت‌دانه عملکرد مناسبی نداشته باشند. اما در یک پژوهش عملی که توسط دی برناردو^۴ در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ انجام گرفت نشان داده شد که استفاده از شمع‌ها پیچشی در این زمین‌ها هم امکان‌پذیر است. این محقق شمع‌هایی را که دارای هلیکس با قطرهای مختلف بودند را در زمین‌های ریزدانه، درشت‌دانه، سنگریزه‌ای و حتی زمین‌های یخ‌زده اجرا کرد و نتیجه گرفت که استفاده از شمع‌های پیچشی در تمام خاک‌ها نتایج قابل قبولی داشته و شرایط خاک بر قطر مناسب پره‌های متصل به شفت تأثیرگذار است و چنانچه قطر مناسب انتخاب شود (قطرهای کوچک برای زمین‌های دانه‌ای و قطرهای بزرگ برای زمین‌های ریزدانه) این شمع‌ها می‌توانند گزینه مناسب برای تحمل نیروی برکنش و همچنین استقرار و ایمن‌سازی ساختمان‌های سبک در زمین‌های مسئله‌دار باشند [۳].

همچنین با توجه به توسعه سریع موتورهای هیدرولیکی قوی‌تر، محدودیت قطر این مدل از شمع‌ها نیز مرتفع گردید و گاهی اجرای این مدل از شمع‌های پیچشی با قطر شفت ۲۰ اینچ در خاک‌های بسیار متراکم نیز امکان‌پذیر شد [۲].

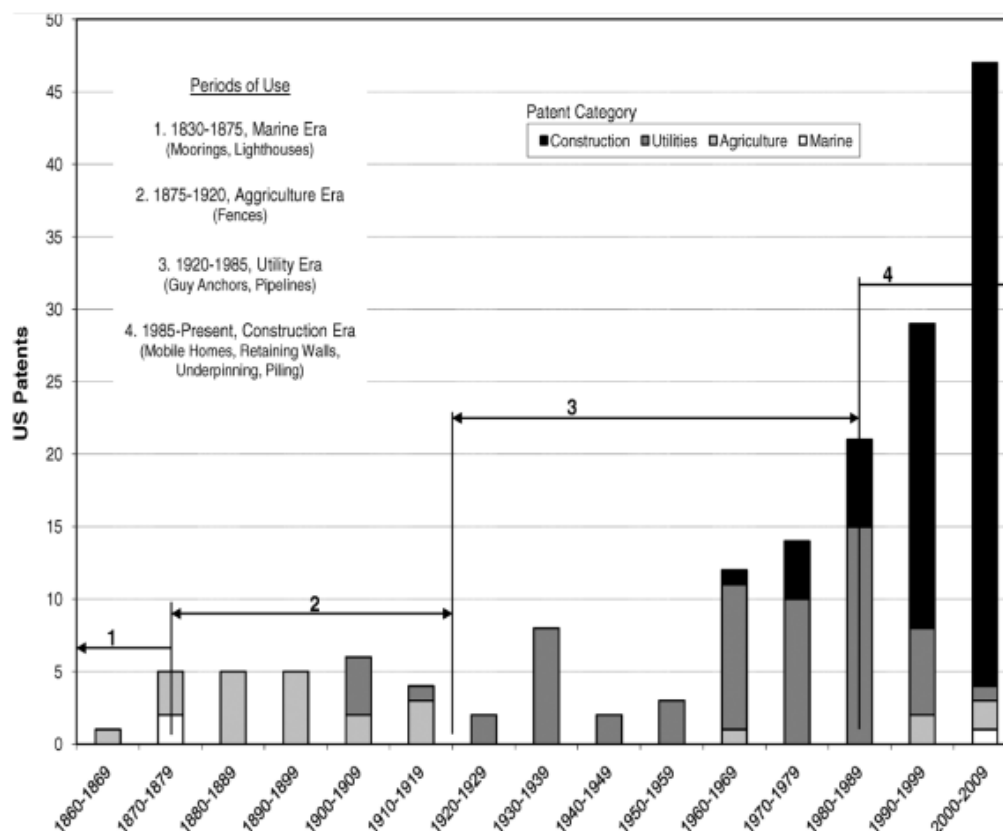
شکل شماره ۱ روند رو به رشد استفاده از شمع‌های پیچشی در کشور آمریکا را نشان می‌دهد.

¹ Helical piles

² Mitchell

³ Maplin

⁴ Di Bernardo



شکل ۱ روند اختراعات و مجوزهای صادره در خصوص شمع‌های پیچشی در کشور آمریکا [۲].

بررسی‌های صورت گرفته توسط اسلامی و همکاران در خصوص رفتار شمع‌های پیچشی نشان می‌دهد که این مدل از شمع‌ها در خاک‌های ماسه‌ای رفتاری متفاوت از شمع‌های معمول داشته و عموماً سختی کمتری نسبت به شمع‌های متداول کوبشی و درجا از خود نشان می‌دهند [۴]. این نوع رفتار شمع پیچشی به علت بروز دست‌خوردگی خاک اطراف جدار شمع در حین نفوذ پره‌های متصل به شمع رخ داده و تحت عنوان دست‌خوردگی حین نصب مطرح می‌باشد؛ که به‌عنوان یکی از محدودیت‌های شمع‌های پیچشی مطرح می‌باشد [۵].

در خصوص دست‌خوردگی رخ داده در لایه‌های خاک در حین نفوذ شمع به خاک و کاهش ظرفیت باربری، محققان بسیاری از جمله لاتنگر^۵ و تسوها^۶ به انجام تحقیقات پرداخته‌اند [۶]. در سال ۲۰۰۰ ویکارس^۷ و همکاران از تزریق برای بهبود ظرفیت باربری استفاده نمودند؛ که نشان دادند عمل تزریق باعث افزایش ظرفیت باربری شمع می‌گردد [۷]. همچنین تحقیق صورت گرفته توسط نبی زاده در سال ۱۳۹۵ مؤید این مسئله می‌باشد که انجام تزریق در جهت بهسازی اثرات دست‌خوردگی ناشی از اجرای شمع‌های پیچشی از ۱۴ تا ۴۲٪ در افزایش ظرفیت باربری مؤثر می‌باشد [۸].

بررسی اکثر تحقیقات نشان‌دهنده این مسئله می‌باشد که در ۱۰ سال اخیر توجه محققان بیشتر به سمت رفع محدودیت‌ها و بهینه کردن عملکرد شمع‌های پیچشی و همچنین رفع اثرات ناشی از دست‌خوردگی بوده است. در این خصوص، اخیراً مهندسان ژئوتکنیک به ابداع مدل‌های مختلفی از این مدل شمع‌ها پرداختند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شمع‌های جابجایی-جایگزینی فولادی [۹]، شمع‌های منبسط شونده [۱۰] و یا شمع تی-سوباسا [۱۱] ابداع‌شده توسط یک گروه صنعتی در کشور ژاپن اشاره کرد که مورد اقبال گسترده مهندسان ژاپنی قرار گرفته است.

⁵ Lutenegeger

⁶ Tsuha

⁷ Vickers

⁸ Drilled displacement steel piles

⁹ T-subasa

بنابراین در تحقیق حاضر علاوه بر ساختن سه مدل شمع لوله‌ای معمولی، جایجایی-جایگزینی فولادی و شمع هلیکال، در جهت رفع محدودیت دست‌خوردگی ناشی از نفوذ پره‌ها به خاک، یک مدل شمع جدید خودبازشونده ساخته شد و مطالعات در خصوص بررسی رفتار شمع‌های مورد مطالعه در مقیاس میدانی انجام شد.

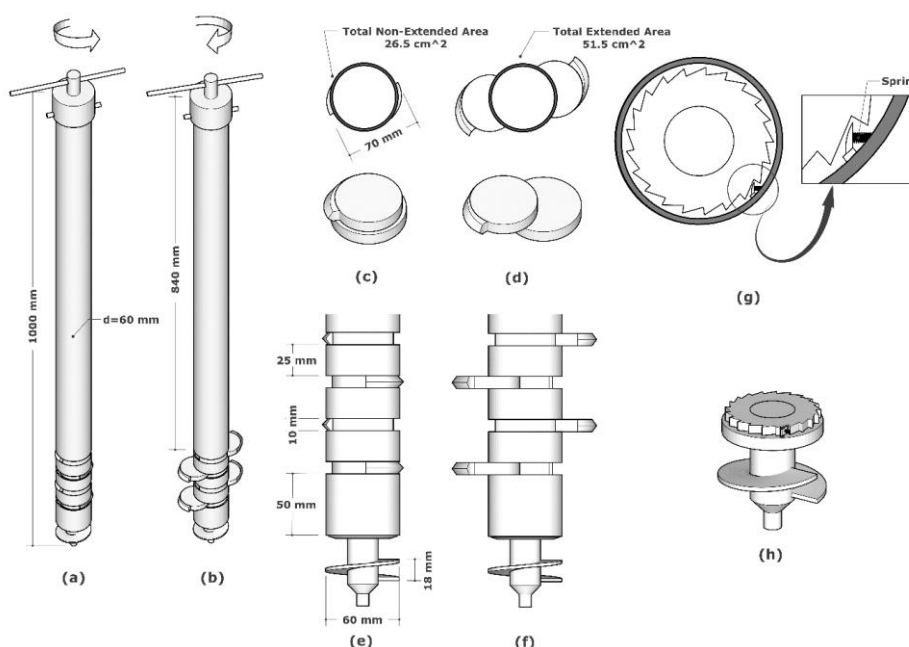
۲- مشخصات شمع‌های مورد مطالعه

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، در تحقیق حاضر جهت بررسی رفتار شمع‌های پیچشی، از یک مدل شمع سنتی لوله‌ای و دو مدل شمع رایج پیچشی جهت مطالعه استفاده می‌گردد. همچنین در جهت رفع محدودیت دست‌خوردگی ناشی از نصب شمع، یک مدل شمع ابداعی ساخته شد که در ادامه به تفصیل به معرفی هریک پرداخته می‌شود.

۲-۱- شمع خودبازشونده (SE)^۱:

هدف اولیه از ابداع شمع‌های خودبازشونده، دسترسی به ظرفیت باربری بالاتر در مقایسه با شمع‌های سنتی و همچنین جلوگیری از دست‌خوردگی بیش از اندازه خاک در حین نصب شمع‌های پیچشی می‌باشد. اساساً این شمع‌ها در بیرون از خاک فاقد پره هستند اما بعد از قرار گرفتن در عمق استقرار و با انجام عملیات مکانیکی خاص نظیر (اعمال گشتاور پیچشی معکوس) قسمتی از جدار شمع تبدیل به بخش منبسط شونده و یا پره می‌گردد.

مدل شمع ابداعی با نام شمع خودبازشونده، از یک لوله فولادی پر مقاومت بدون درز رده ۶۰ به‌عنوان شفت اصلی و یک بخش پیشران اوگر شکل در نوک خود تشکیل شده است. در بخش تحتانی شمع مذکور چهار عدد دیسک فولادی در داخل شفت قرار گرفته است که هر کدام دارای زائده‌های قلاب فرمی در انتهای خود هستند که در حالت نفوذ شمع با استفاده از گشتاور ساعت‌گرد به داخل زمین هدایت شده و در زمان مواجهه با چرخش پادساعت‌گرد، بخش قلاب فرم آن‌ها با خاک اطراف درگیر شده و با چرخش رخ داده بر روی دیسک داخلی به سمت بیرون کشیده شده و به داخل خاک نفوذ می‌کنند. بخش‌های مختلف این مدل شمع در شکل شماره ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲ بخش‌های مختلف تشکیل دهنده شمع خودبازشونده

لازم به توضیح است که نوک پیشران به‌گونه‌ای طراحی شده است که در هنگام نفوذ شمع به داخل خاک، نوک اوگرفرم نقش پیشران را داشته و در هنگام اعمال گشتاور پادساعت‌گرد، در محل خود به‌صورت هرزگرد عمل کرده و صرفاً جهت بیرون کشیده شدن پره‌ها عمل کرده و شفت شمع فاقد جابجایی به سمت بالا باشد.

۲-۲- شمع جابجایی-جایگزینی فولادی (DDS)!

یکی از شمع‌های پیچشی متداول که اخیراً در آمریکای شمالی و کانادا به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است شمع جابجایی-جایگزینی فولادی می‌باشد. این شمع از یک شفت فولادی به همراه یک نوک مخروطی شکل تشکیل شده است که به بخش انتهایی شفت جوش داده شده و دارای پره‌های پیچی شکل جهت نفوذ دادن شمع به داخل خاک می‌باشد [۹]. در کشور آمریکا از این مدل شمع در بیش از یکصد پروژه نظیر بهسازی ترمینال بین‌المللی فرودگاه لس‌آنجلس و ساختمان ۴۵ شرکت بوئینگ بهره‌برداری شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. شمع جابجایی-جایگزینی مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل شماره ۲ مشخص می‌باشد.

۲-۳- شمع هلیکال فولادی:

شمع‌های هلیکال نوعی از شمع‌های پیچشی هستند که در سالیان گذشته به علت شکل ظاهری خاص خود و عملکرد متفاوت جزو دسته‌بندی شمع‌های معمول قرار نگرفته بودند، ولیکن 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 به‌عنوان یک شمع کامل (برای تحمل بارهای کششی و فشاری) مورد بحث و توجه قرار گرفته است [۱۳].

شمع‌های هلیکال به‌صورت معمول از فولاد با مقاومت بالا تشکیل شده و شامل پره‌های فولادی هستند که در فاصله خاصی از یکدیگر به شفت مرکزی متصل شده‌اند. همچنین این شمع‌ها دارای نوکی تیز برای نصب و اجرای بهتر به داخل زمین هستند [۱۴]. شمع هلیکال مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل شماره ۲ مشخص می‌باشد.

۲-۴- شمع کوبشی فولادی:

شمع‌های کوبشی به‌عنوان قدیمی‌ترین نوع از شمع‌های متداول در ساخت‌وسازهای ساحلی و فراساحلی مطرح می‌باشد که با توجه به کاربرد گسترده آن‌ها در صنعت ساخت و ساز، در تحقیق حاضر نیز یک نمونه از شمع‌های لوله‌ای کوبشی ساخته شد. شمع ساخته شده از یک لوله به قطر ۴ اینچ بدون درز رده ۶۰ ساخته شد و با توجه به پیش بینی لهیدگی رأس شمع به علت ضربات چکش، به میزان ۳۰ سانتی‌متر به طول اولیه شمع افزوده شد.



شکل ۳ مدل شمع‌های استفاده‌شده در تحقیق

¹ Drilled displacement steel piles

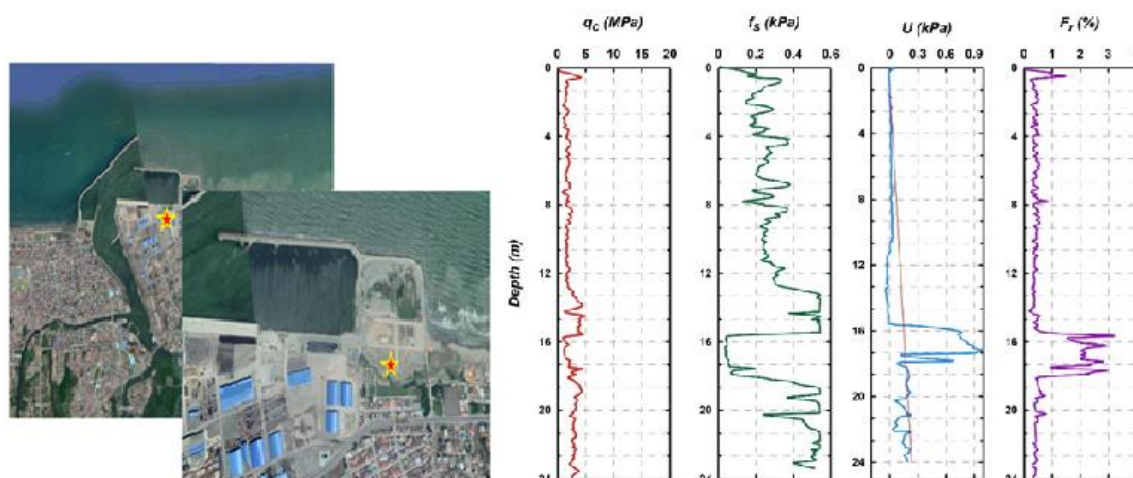
تمامی مدل شمع‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر اعم از شمع‌های پیچشی، خودبازشونده و معمولی از جنس فولاد ساخته شده و مشخصات هندسی شمع‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات مدل شمع‌های استفاده شده در تحقیق حاضر.

نوع شمع	طول شمع (mm)	قطر شفت (mm)	عمق استقرار شمع (mm)	نسبت L/D	عرض منبسط شونده یا قطر پره (mm)	روش نصب شمع
شمع لوله‌ای فولادی	۳۵۰۰	۱۱۵	۳۲۰۰	۲۷/۸	---	کوبشی
شمع خودبازشونده	۳۵۰۰	۱۱۵	۳۲۰۰	۱۲/۸	۲۵۰	پیچشی
شمع هلیکال فولادی	۳۵۰۰	۱۱۵	۳۲۰۰	۱۲/۸	۲۵۰	پیچشی
شمع جابجایی-جابگزینی فولادی	۳۵۰۰	۱۱۵	۳۲۰۰	۲۷/۸	۱۱۵	پیچشی
شمع هلیکال فولادی ۲ پره-انکر	۶۰۰۰	۱۱۵	۵۰۰۰	۱۲/۵	۴۰۰	پیچشی

۳ مشخصات سایت مورد مطالعه

با همکاری و موافقت سازمان بنادر و دریانوردی استان گیلان، محوطه بندری گمرک بندرانزلی به عنوان محل انجام آزمایشات انتخاب گردید. شهرستان بندرانزلی، در شمال استان گیلان و به صورت یک نوار باریک در امتداد خط ساحلی کشیده شده است. به همین دلیل خصوصیات و ویژگی‌های لایه‌های خاک در این شهر، اغلب همان خصوصیات کناره ساحل خزر است، بدین صورت که عمده خاک‌های تشکیل‌دهنده این قسمت، ماسه‌های بسیار ریزدانه همراه با ذرات لای هستند. نتایج حاصل از آزمایش (CPT) در سمت راست شکل شماره ۴ و موقعیت جغرافیایی محل آزمایشات در سمت چپ شکل شماره ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ شکل سمت راست) نتایج آزمایش CPT در محل انجام مطالعات. شکل سمت چپ) موقعیت جغرافیایی سایت مورد مطالعه.

مشخصات سایر آزمایشات انجام گرفته در خصوص ماسه انزلی در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات خاک مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

۴۵-۵۰	دانسیتته نسبی %	۲۶/۹	وزن مخصوص ویژه
۳۲/۴	زاویه اصطکاک (°)	۱۶/۹	وزن مخصوص خشک ماکزیمم (KN m ⁻³)
۰/۰۸۷	چسبندگی	۱۵/۸	وزن مخصوص خشک مینیمم (KN m ⁻³)
۲/۱	ضریب یکنواختی (Cu)	۰/۸۹	نسبت تخلخل ماکزیمم
۱/۱	ضریب انحنای	۰/۶۹	نسبت تخلخل مینیمم
		۰/۲۱	اندازه متوسط دانه‌ها (mm) D50

۴ تجهیزات نصب و بارگذاری

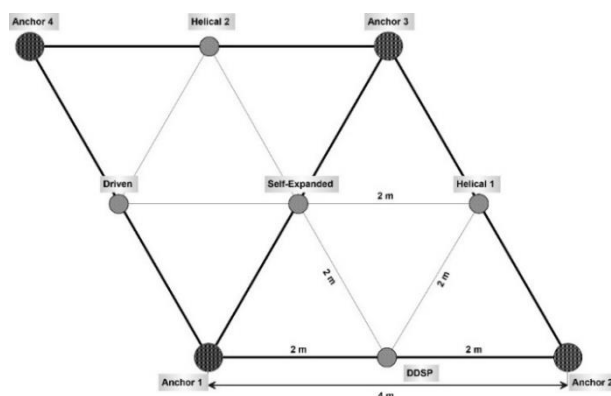
همان‌گونه که از نام شمع‌های پیچشی مشخص می‌باشد، این مدل از شمع‌ها با اعمال نیروی گشتاور و مقداری نیروی محوری رو به پایین اجرا می‌شوند. استفاده از یک دستگاه اعمال کننده گشتاور که بر روی یک بیل مکانیکی نصب شده و از توان هیدرولیکی برای اعمال گشتاور بهره می‌گیرد، متداول‌ترین روش برای نصب این مدل از شمع‌ها در سراسر دنیا می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر یک دستگاه اعمال کننده گشتاور بر روی بیل مکانیکی نصب و برای اجرای شمع‌ها از آن استفاده شد. برای اطمینان از نصب شمع به صورت قائم یک دستگاه الکترونیکی کنترل کننده زاویه نصب به دستگاه اعمال کننده گشتاور متصل شد. از آنجایی که استفاده از گشتاور مورد نیاز برای نصب شمع‌های پیچشی به عنوان یکی از معیارهای تعیین ظرفیت باربری این شمع‌ها مطرح می‌باشد، لذا از یک سنسور گشتاورسنج برای تعیین مقدار گشتاور اعمالی در حین اجرای شمع‌ها بهره گرفته شد که با اتصال به کامپیوتر، گشتاور وارده از دستگاه را به طور متناوب بر روی صفحه نمایش داده و در سیستم ثبت می‌نماید. استفاده از گشتاور برای تعیین ظرفیت باربری این شمع‌ها به دلیل سهولت و امکان استفاده برای تمامی شمع‌های نصب شده به این روش، در بین پیمانکاران و مشاوران از محبوبیت بالایی برخوردار بوده و به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل شماره ۵ تجهیزات نصب نشان داده شده است.



شکل ۵ تجهیزات هیدرولیکی مورد نیاز جهت نصب شمع

در تحقیق حاضر چهار شمع شامل دو شمع هلیکال (برای بررسی تکرارپذیری)، یک شمع جابجایی-جایگزینی فولادی، یک شمع ابداعی خودباز شونده با استفاده از تجهیزات توضیح داده شده در بندر انزلی اجرا شد. همچنین یک شمع فولادی به روش کوبشی اجرا شد. برای تامین نیروی عکس‌المعمل لازم برای انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی، از ۴ شمع ۶ متری هلیکال با دو پره به قطر ۴۰ سانتی‌متر و

قطر شفت ۱۱ سانتی متر که تا عمق ۵ متری در خاک رانده شده‌اند، استفاده گردید. پلان شمعی‌های اجرا شده در شکل شماره ۶ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶ شکل شماتیک جاگذاری شمعی‌ها و انکرهای بارگذاری

از آنجا که شمعی‌های مورد مطالعه در این تحقیق در اکثر پروژه‌های اجرایی، بعد از مدتی کوتاه پس از اجرا تحت بار سرویس قرار می‌گیرند، در این تحقیق، سه روز پس از اجرا، شمعی‌ها مورد آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری سریع قرار گرفتند. از یک تیر آهن دابل IPE 27 تقویت شده بوسیله ورق‌های آهنی به عنوان تیر تکیه‌گاهی استفاده شد. تیر تکیه‌گاهی به وسیله دو پیچ بلند و دو سرشمع به شمعی‌های کششی (انکر) متصل گردید تا از این طریق، بار عکس العمل ناشی از بارگذاری را به انکرها منتقل نماید. برای اعمال بار به شمعی آزمایشی جک هیدرولیکی ۳۰ تن مورد استفاده قرار گرفت. مقدار بار وارده توسط یک لودسل ۳۰ تن دوطرفه (حساس به کشش و فشار) اندازه‌گیری و مقدار جابجایی شمعی با استفاده از یک جابجایی سنج با دقت یکصدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد. اطلاعات مربوط به بار و جابجایی توسط یک سیستم جمع آوری داده‌ها ثبت و در کامپیوتر ذخیره شد. تجهیزات بارگذاری در شکل شماره ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایی از تجهیزات آزمایش بارگذاری استاتیکی

۵- بحث و بررسی:

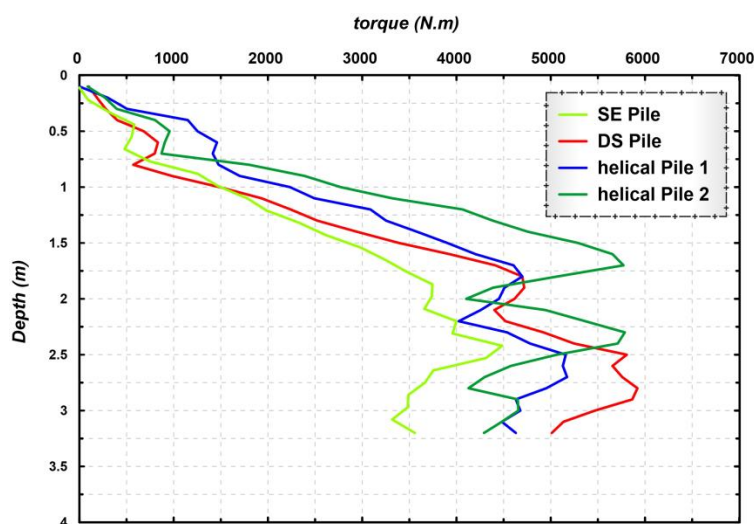
۵-۱- روند انجام آزمایش بارگذاری

در تحقیق حاضر از روش بارگذاری سریع مطابق آیین نامه ASTM D1143M برای بارگذاری فشاری شمع‌های مورد مطالعه، استفاده شد [۱۵]. در این روش در هر مرحله به میزان ۱۰٪ تا ۱۵٪ بار نهایی تخمینی شمع به آن، نیرو وارد شده و سپس ۲/۵ دقیقه و یا هر زمان از پیش تعیین شده دیگری، بار را ثابت نگه داشته و پس از آن بار را افزایش می‌دهند، این سیکل بارگذاری تا هنگامی که برای ثابت نگه داشتن بار نیاز به حرکت پیوسته جک باشد، ادامه می‌یابد. در آزمایشات این تحقیق فاصله زمانی ۵ دقیقه به عنوان فاصله دو مرحله بارگذاری انتخاب شد.

۵-۲- گشتاور مورد نیاز جهت نصب

شمع‌های پیچشی مورد مطالعه در تحقیق حاضر با استفاده از نیروی گشتاور اعمال شده توسط تجهیزات هیدرولیکی ذکر شده در بخش ۴ تا عمق ۳/۲ متر به داخل خاک رانده شده و میزان گشتاور مورد نیاز جهت نصب هر یک از شمع‌ها توسط سنسور ثبت گشتاور، بر حسب عمق نفوذ شمع ثبت گردید. شکل شماره ۸ تغییرات گشتاور مورد نیاز جهت نصب و میزان آن‌ها بر حسب عمق نفوذ شمع را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل شماره ۸ مشخص می‌باشد، تمام شمع‌های پیچشی، تا عمق ۲ متری از سطح زمین با افزایش گشتاور روبرو بوده و بعد از رسیدن به عمق نفوذ ۲ متر از میزان گشتاور مورد نیاز جهت نصب آن‌ها کاسته می‌شود. این رفتار کاهش در گشتاور مورد نیاز جهت نصب در تمام شمع‌های پیچشی و همچنین در روند نصب هلیکال‌های دو پره ۶ متری مورد استفاده به عنوان انکر نیز کاملاً مشهود بود.



شکل ۸ تغییرات گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع‌ها در عمق

همان‌گونه از نمودار نتایج تست CPT (شکل ۴) مشخص می‌باشد، سطح آب زیرزمینی در تراز ۱،۵ الی ۲ متری سطح زمین قرار داشته و شرایط خاک در این بازه دچار تغییر شده است. این حالت تغییر مشخصات خاک و وجود سطح آب زیرزمینی در نتایج ثبت شده برای گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع‌های پیچشی نیز مشهود می‌باشد.

یکی از قابلیت‌های ویژه در شیوه نصب شمع‌های پیچشی، تخمین و تشخیص تغییرات رخ داده در لایه‌های زیرزمینی بر اساس تغییرات گشتاور ثبت شده توسط سیستم ثبت داده‌ها می‌باشد. از این مزیت شیوه نصب، جهت تخمین ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی با

استفاده از روابط تجربی مشخص برای هر منطقه استفاده می‌شود. روابط متعددی جهت تخمین رابطه میان ظرفیت باربری و گشتاور مورد نیاز جهت نصب توسط محققان مختلف ارائه شده است که از مهمترین تحقیقات صورت گرفته می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط سکر^۱، تسوها و همکاران اشاره کرد [۱۶، ۱۷].

مقایسه گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع هلیکال با شمع جابجایی-جایگزینی فولادی نشان‌دهنده تاثیر دست‌خوردگی قبل از نفوذ کامل شمع به خاک در کاهش گشتاور موردنیاز جهت نصب شمع می‌باشد. بدین مفهوم که چنانچه خاک موجود در مقابل نفوذ شمع، قبل از نفوذ کامل شمع توسط پره‌های هلیکال دست‌خورده شوند، جهت متراکم سازی خاک بعلت جای‌گیری شفت شمع، به انرژی کمتری نیاز بوده و به عبارت بهتر در مقایسه با حالتی که هیچ‌گونه دست‌خوردگی و بهم‌خوردگی در خاک بوجود نیامده باشد، شمع با گشتاور کمتری به داخل خاک نفوذ می‌کند.

همان‌گونه که از شکل شماره ۸ مشخص می‌باشد شمع جابجایی-جایگزینی فولادی تا تراز یک دوم عمق نفوذ، در مقایسه با هلیکال به گشتاور کمتری نیاز داشته و بعد از عبور از تراز یک دوم عمق نفوذ، به علت عملکرد متراکم سازی خاک دست‌خورده پیرامونی، به گشتاورهای بالاتری جهت نصب نیاز پیدا می‌کند. گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع جابجایی-جایگزینی فولادی در تراز یک دوم انتهایی عمق استقرار، به میزان ۶۰۰۰ نیوتن-متر رسیده و این در حالیست که برای نصب یک شمع پیچشی (هلیکال) با قطر پره ۲۵ سانتی‌متر به میزان گشتاوری معادل با ۵۲۰۰ نیوتن-متر نیاز می‌باشد.

در خصوص گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع خودبازشونده ابداعی، وجود زائده‌های قلاب فرم موجود در بخش پره‌های خودبازشونده نیز با ایجاد میزان مشخصی از دست‌خوردگی، موجب کاهش گشتاور مورد نیاز جهت نصب شده و در نهایت این مدل شمع ابداعی نیز با گشتاوری معادل ۴۵۰۰ نیوتن-متر نصب و آماده بارگذاری می‌گردد. در خصوص شمع خودبازشونده جهت تکمیل عملیات نصب شمع، از گشتاور پادساعتگرد به میزان ۲۲۰۰ نیوتن-متر استفاده شد، به این صورت که با استفاده از یک عدد شیر برقی هیدرولیکی قرارگرفته در مسیر شیلینگ‌های هیدرولیک، با تغییر جهت جریان هیدرولیک، جهت چرخش دستگاه اعمال کننده گشتاور برعکس شده و با ۲ دور چرخش معکوس فرآیند باز شدن پره‌ها تکمیل گردید.

۵-۳- ظرفیت باربری و رفتار شمع‌ها

همان‌گونه که بیان شد بعد از اتمام عملیات نصب، شمع‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، اقدام به انجام آزمایشات بارگذاری استاتیکی سریع جهت مقایسه رفتار و عملکرد شمع‌ها شد. نتایج حاصله در خصوص ظرفیت باربری و شناخت رفتار شمع‌های مورد مطالعه در قالب نمودارهای بار-جابجایی جداگانه در شکل شماره ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

برای مقایسه عملکرد شمع ابداعی با سایر شمع‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، نیاز به تعیین یک معیار شکست واحد به‌عنوان مبنای مقایسه رفتار شمع‌های مورد آزمایش می‌باشد. در تحقیقات انجام گرفته توسط اسلامی و فلنیوس^۴ در شرایط خاص مبنی بر عدم تعیین معیار خاص شکست، رخداد پلانچ^۵ شمع به‌عنوان معیار شکست در نظر گرفته شده است [۱۸]. بنابراین در این تحقیق نیز در جهت مقایسه عملکرد شمع‌های ابداع شده با شمع‌های سنتی، از رخداد پلانچ به‌عنوان معیار واحد جهت مقایسه ظرفیت باربری نهایی و همچنین رفتار شمع‌ها استفاده شد.

جهت مقایسه ظرفیت باربری و رفتار شمع‌های پیچشی در ۲ مدل متداول و ابداعی با شمع‌های سنتی، از یک شمع لوله‌ای با ابعاد مشابه نصب شده به‌روش کوبشی جهت مقایسه استفاده شد. نمودار بار-جابجایی مربوط به شمع کوبشی در شکل شماره ۹-الف مشخص می‌باشد. راندولف^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۳ نشان دادند که ظرفیت باربری فشاری نهایی تک شمع در جابجایی معادل با ۵ الی ۱۰ درصد

¹ Sakr 3

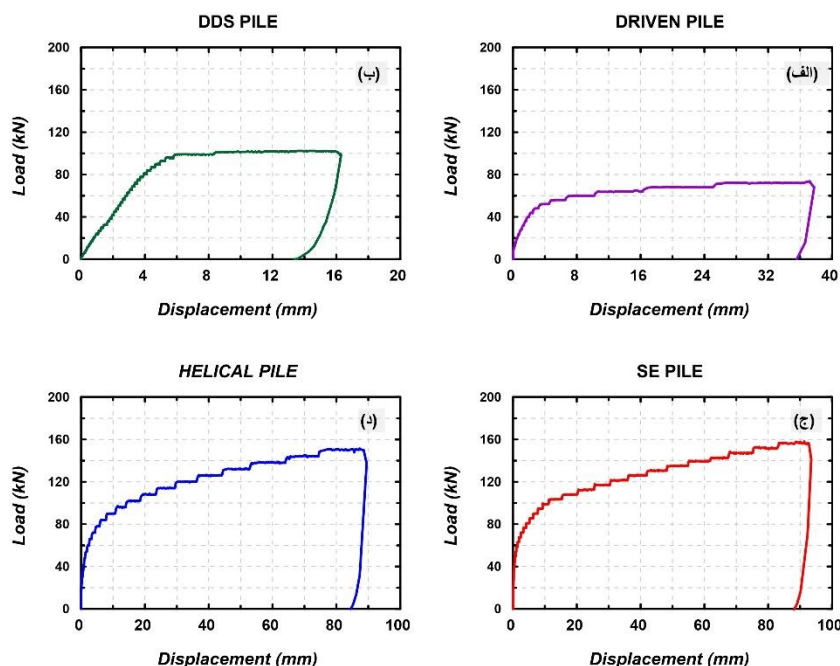
⁴ Islami and Fellenius

¹ Plunging criteria 5

¹ Randolph 6

قطر شمع بدست می‌آید [۱۹]. شمع کوبشی نصب شده در این تحقیق نیز در جابجایی معادل ۵ درصد قطر شمع (۵/۵ میلی متر) به ظرفیت باربری نهایی خود رسیده و سپس پس از تحمل مقدار ناچیزی از بار فشاری وارده، به مرحله گسیختگی خود می‌رسد. نتیجه حاصله در خصوص ظرفیت باربری نهایی شمع با دستاوردهای بدست آمده توسط راندولف و همکاران تطابق خوبی دارد. بار نهایی در مرحله پلانچ شمع کوبشی معادل با ۵۰ کیلو نیوتن در جابجایی معادل با ۱۰ درصد قطر شمع قابل مشاهده می‌باشد.

در مقایسه با شمع کوبشی، رفتار شمع جابجایی-جایگزینی فولادی نیز در شکل شماره ۹-ب مشخص می‌باشد. هر دو شمع کوبشی و شمع جابجایی-جایگزینی فولادی از بابت هندسه و عمق استقرار با یکدیگر برابر بوده و تنها تفاوت آن‌ها از بابت روش نصب شمع می‌باشد.



شکل ۹ نمودار بار-جابجایی شمع‌های تحقیق الف) شمع کوبشی. ب) شمع جابجایی-جایگزینی فولادی. ج) شمع ابداعی خودبازشونده. د) شمع هلیکال

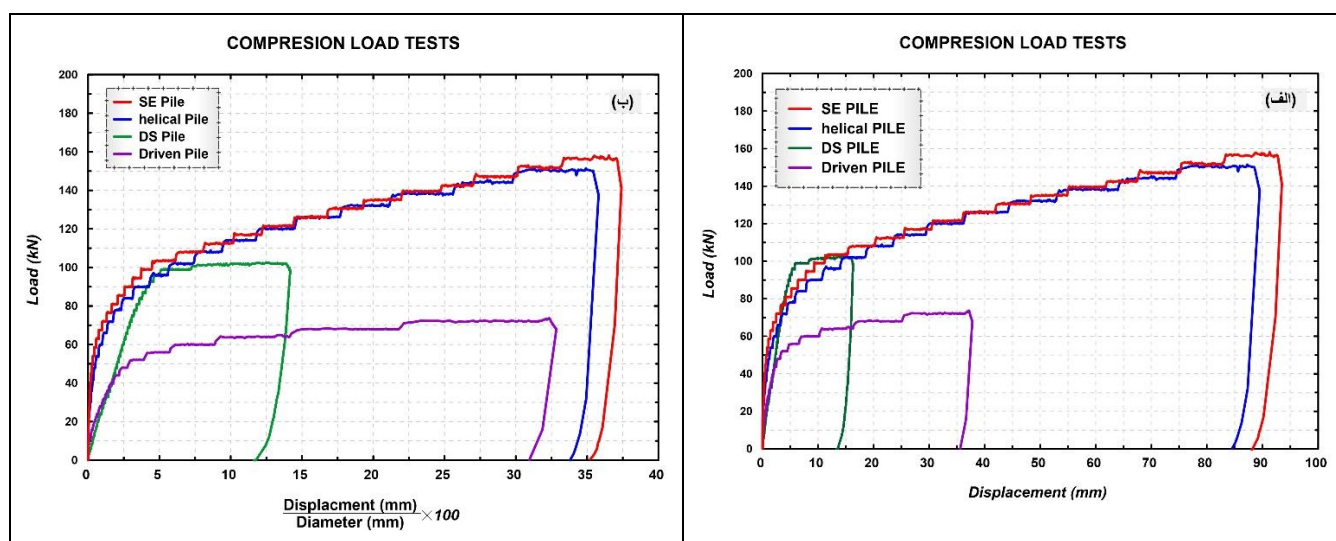
شمع جابجایی-جایگزینی فولادی با استفاده از نوک پیشران و همچنین اعمال گشتاور پیچشی به میزان ۶۰۰۰ نیوتن-متر در سایت نصب گردید. همان‌گونه که قبلاً در بخش (۵-۲) اشاره شد، این شمع در مقایسه با سایر شمع‌های پیچشی گشتاور نصب قابل توجهی را نیاز داشته است و تنها علت این امر وجود اصطکاک فراوان میان کل جداره شفت با خاک پیرامونی در حین نصب می‌باشد که این موضوع در بررسی رفتار شمع در حین بارگذاری نیز مشهود می‌باشد چرا که با توجه به نمودار بار-جابجایی شمع می‌توان دریافت که این مدل شمع در مقایسه با شمع کوبشی از سختی پایین‌تری برخوردار بوده و علیرغم حصول ظرفیت باربری بالاتر نسبت به شمع کوبشی، سختی کمتری را از خود نشان داده است. شمع جابجایی-جایگزینی فولادی در جابجایی معادل با ۵ درصد قطر شمع (۵/۵ میلی متر) ظرفیت باربری نهایی معادل با ۹۰ کیلو نیوتن را بدست آورده و بعد از تحمل میزان بسیار اندکی از بار فشاری در گام‌های بعدی به نقطه تسلیم می‌رسد.

در خصوص شمع هلیکال، نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع در شکل شماره ۹-د نشان داده شده است. شمع هلیکال علیرغم داشتن قطر شفت یکسان با شمع‌های کوبشی و جابجایی-جایگزینی فولادی، با توجه به داشتن پره متصل به شفت به قطر ۲۵ سانتی متر، از ظرفیت باربری بالاتری نسبت به شمع‌های مذکور برخوردار می‌باشد. همان‌گونه که از نمودار بار-جابجایی شمع مشخص می‌باشد، این شمع رفتاری کاملاً متفاوت با شمع‌های کوبشی و جابجایی-جایگزینی فولادی از خود نشان داده است. در این مدل شمع علیرغم تجربه جابجایی‌های بیشتر، هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر پلانچ مشاهده نمی‌گردد. این نوع رفتار در خصوص شمع‌های پیچشی نظیر شمع‌های هلیکال و یا سایر شمع‌های پره‌ای کاملاً متعارف می‌باشد.

شمع هلیکال در جابجایی معادل با ۱۰ درصد قطر شمع، بار فشاری معادل با ۱۰۰ کیلو نیوتن را تحمل کرده و با رخداد جابجایی‌های بیشتر، همچنان بار بیشتری را در کنار رخداد جابجایی‌های بالاتر تحمل می‌نماید. شمع هلیکال در جابجایی رخ داده معادل با ۳۰ درصد قطر شمع (۷۵ میلی‌متر) به ظرفیت‌باربری ۱۴۰ کیلو نیوتن رسیده است.

از سوی دیگر با بررسی و مقایسه گشتاور مورد نیاز جهت نصب برای هر دو شمع هلیکال و شمع ابداعی در شکل شماره ۸ می‌توان دریافت که شمع خودبازشونده به علت عدم حضور پره‌های متصل به شفت در بخش بیرونی شمع، به گشتاوری کمتری جهت نصب نیاز داشته است که با نتایج ارائه شده توسط شجاعی و همکاران در سال ۲۰۲۱ که به منظور بررسی قابلیت شمع‌های خودبازشونده ابداعی در دانشگاه امیرکبیر و به کمک دستگاه FCV صورت پذیرفت مطابقت دارد [۲۰]. از طرفی با توجه به اینکه بعد از باز شدن پره‌ها در عمق استقرار معین، شمع خودبازشونده به نوعی همانند شمع هلیکال خواهد بود، بنابراین برای شمع خودبازشونده ابداعی نیز رفتاری مشابه با شمع هلیکال با قطر پره معادل مورد انتظار می‌باشد. با بررسی نتایج بار-جابجایی شمع ابداعی در مقایسه با شمع هلیکال، افزایش ملموسی در سختی شمع ابداع شده مشهود می‌باشد که این موضوع می‌تواند به علت دست‌خوردگی کمتر رخ داده در خاک پیرامون شمع در حین نفوذ باشد. هرچند که این مهم (دست‌خوردگی کمتر خاک در حین نصب) یقیناً در بهبود رفتار و ظرفیت کششی شمع‌های پیچشی به علت به حداقل رسیدن دست‌خوردگی خاک فوقانی، ملموس‌تر خواهد بود. شمع خودبازشونده در جابجایی‌هایی معادل با ۱۰ و ۳۰ درصد قطر شمع، به ترتیب باری معادل با ۱۱۰ و ۱۳۵ کیلو نیوتن را تحمل نمود.

نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی سریع برای تمام مدل شمع‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل شماره ۱۰-الف و جدول شماره ۳ نشان داده شده است. همچنین جهت مقایسه بهتر رفتار مدل شمع‌های مختلف با یکدیگر نمودار بار-جابجایی هر یک بر اساس جابجایی معادل با درصدی از قطر شمع در شکل شماره ۱۰-ب نشان داده شده است.

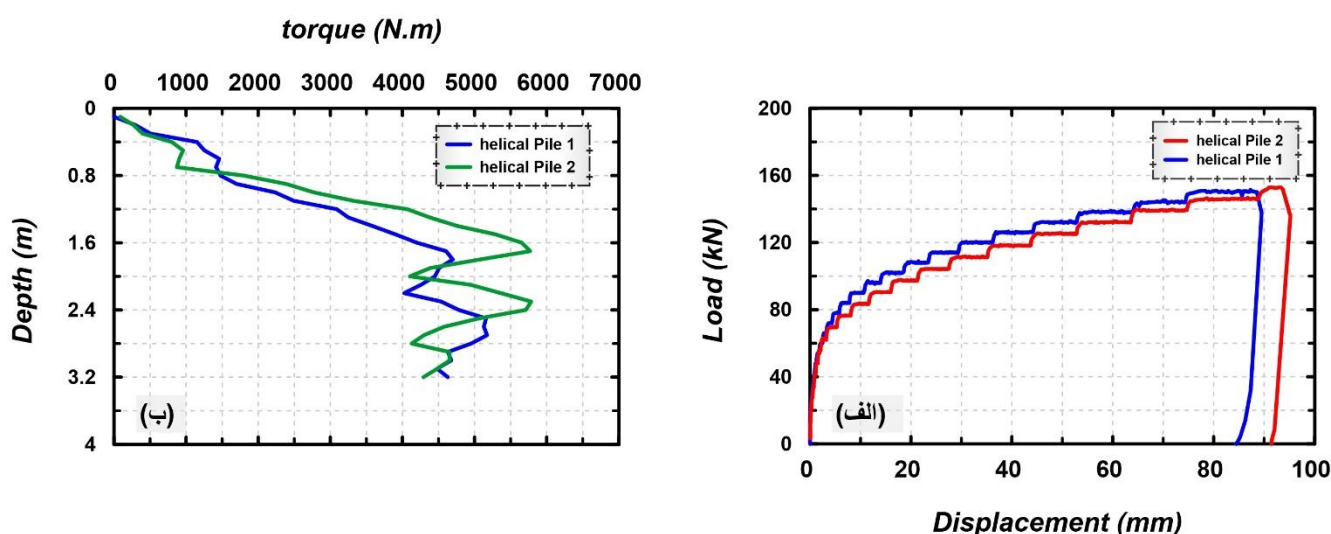


شکل ۱۰ نمودارهای بار-جابجایی شمع‌های تحقیق الف) جابجایی بر حسب میلی‌متر. ب) جابجایی بر حسب درصدی از قطر شمع.

جدول ۳ ظرفیت باربری شمع‌ها در جابجایی‌های معادل با ۵، ۱۰ و ۳۰ درصد قطر شمع

نام شمع	عمق مدفون (m)	ظرفیت باربری در جابجایی معادل با ۵٪ قطر شمع (kN)	ظرفیت باربری در جابجایی معادل با ۱۰٪ قطر شمع (kN)	ظرفیت باربری در جابجایی معادل با ۳۰٪ قطر شمع (kN)
هلیکال	3.2	۹۵	۱۱۰	۱۴۰
کوبشی	3.2	۵۳	۶۰	۶۵
خودبازشونده	3.2	۱۰۰	۱۱۰	۱۳۵
جابجایی-جایگزینی فولادی	3.2	۹۰	۱۰۰	-

لازم به توضیح می باشد، یکی از نکات مهمی که در ارزیابی نتایج آزمایشگاهی و میدانی حائز اهمیت می باشد، بررسی خطاهای احتمالی در انجام و ثبت نتایج آزمایشات می باشد. خطاهای مختلفی نظیر، خطاهای مربوط به عدم قرائت صحیح، عدم کالیبره بودن تجهیزات، خطاهای انسانی در اجرا و یا ثبت نادرست نتایج که می توانند گاهی موجب بروز خطای محتمل در اجرای تحقیقات گردند. در این خصوص به منظور بررسی کلیه این عوامل و تخمین محدوده خطاهای محتمل در برآورد نتایج و در جهت بررسی صحت نتایج به دست آمده، بررسی تکرارپذیری نتایج آزمایشات به عنوان معمول ترین روش مطرح می باشد. در تحقیق حاضر در جهت بررسی صحت انجام آزمایشات، دو آزمایش بارگذاری محوری فشاری مجزا بر روی دو شمع هلیکال مشابه به همراه ثبت گشتاور مورد نیاز جهت نصب، صورت گرفت. همان گونه که در نمودارهای بار-جابجایی و گشتاور بر حسب عمق موجود در شکل شماره ۱۱ مشخص است، تکرارپذیری خوبی در این آزمایشها مشاهده می گردد.



شکل ۱۱ نمودارهای تکرارپذیری آزمایشات. الف) آزمایش بارگذاری بر روی دو شمع هلیکال یکسان. ب) تغییرات گشتاور بر حسب عمق دو شمع هلیکال یکسان.

بررسی نمودار ۱۱-الف نشان می دهد که تغییرات گشتاور مورد نیاز جهت نصب در هر دو شمع اجرا شده تقریباً رفتار مشابهی داشته و اختلافات جزئی مورد مشاهده، ناشی از سایر عوامل غیرقابل کنترل نظیر سرعت چرخش دستگاه روتاری و همچنین فشار سربار اعمالی توسط بیل مکانیکی در حین نصب می باشد که با توجه به ماهیت نصب شمع های پیچشی قابلیت کنترل دقیق را ندارند. از طرفی با توجه به تخمین ظرفیت باربری نهایی شمع هلیکال قبل از شروع روند بارگذاری، و رعایت گام های برابر بارگذاری، تکرارپذیری بسیار قابل قبولی در رفتار شمع هلیکال نصب شده تحت بار محوری فشاری در حین آزمایشات مشهود می باشد.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از تجهیزات نصب شمع های پیچشی، دو مدل شمع پیچشی متعارف در کشورهای آمریکای شمالی و کانادا به همراه یک عدد شمع کوبشی و یک مدل شمع ابداعی جدید در خاک ماسه ای انزلی اجرا شد. در حین نصب شمع های پیچشی و ابداعی با استفاده از یک عدد سنسور دیجیتالی گشتاورسنج، گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع های پیچشی در رایانه ثبت گردید. پنج سری آزمایش بارگذاری فشاری استاتیکی سریع بر روی شمع های اجرا شده انجام شد و نتایج حاصل بر اساس بندهای زیر قابل بیان می باشد:

✓ مقایسه ظرفیت باربری شمع های پیچشی با شمع متداول کوبشی نشان دهنده ظرفیت باربری فشاری قابل توجه شمع های پیچشی در مقایسه با شمع کوبشی می باشد که می توان نتیجه گرفت شمع های پیچشی می توانند به عنوان جایگزین بسیار مناسبی برای شمع های کوبشی مطرح باشند.

✓ مکانیزم خودبازشوندگی در عمق برای شمع خودبازشونده ابداعی در تحقیق حاضر، گشتاور مورد نیاز جهت نصب شمع را در مقایسه با سایر شمع‌های پیچشی نظیر هلیکال و شمع جابجایی-جایگزینی فولادی کاهش داده و با توجه به دست‌خوردگی کمتر خاک پیرامون شمع در حین نصب، رفتار با سختی بیشتری در مقایسه با سایر شمع‌های پیچشی در این مدل از شمع ابداعی مشهود است.

✓ مقایسه ظرفیت‌باربری شمع جابجایی-جایگزینی فولادی و شمع کوبشی با لحاظ هندسه و میزان مصالح مصرفی و همچنین اخذ ظرفیت‌باربری بالاتر شمع جابجایی-جایگزینی فولادی در مقایسه با شمع کوبشی در یک جابجایی رخ داده مشخص، نشان از ظرفیت بالاتر شمع جابجایی-جایگزینی فولادی در مقایسه با شمع کوبشی و در خاک سایت مورد مطالعه می‌باشد. هرچند که ویژگی‌های دیگری نظیر عدم ارتعاش، عدم آلودگی صوتی، سرعت نصب بالاتر و سهولت دسترسی به مناطق پرتراکم شهری از سایر مزیت‌های این شیوه نصب نسبت به دیگر روش‌های اجرای شمع‌های فولادی می‌باشد.

تقدیر و تشکر

ضمن تشکر از همکاری تمامی پرسنل بنادر و دریانوردی استان گیلان که با مساعدت‌ها و همراهی خود محیطی امن و آرام برای تیم تحقیقاتی مهیا نمودند؛ از آقای دکتر آبائی ریاست محترم وقت این اداره و همچنین مهندس شهرام نواری مسئول نگهداری و تاسیسات اداره و همچنین آقای مهندس شیرین‌زبان نیز کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۷- مراجع

1. Sivakugan, N and Das, B M. (2009). *Geotechnical engineering: a practical problem solving approach*. USA: J. Ross Publishing. 506.
2. Perko, H A. (2009). *Helical piles: a practical guide to design and installation*. New jersey: John Wiley & Sons. 528.
3. Di Bernardo, G. (2012). *Helical pile Deck foundation*. New Jersey Deck Boulder, USA: Available at: <https://www.technopieux.com/wp-content/uploads/2017/08/helical-pile-deck-foundations-a-new-jersey-deck-builder-liked-helical-piles-so-much-he-started-a-new-business-professional-deck-builder-screw-piles.pdf>
4. Khazaei, J and Eslami, A. (2017). Postgrouted helical piles behavior through physical modeling by FCV. *Marine Georesources Geotechnology*, 35(4), 528-537.
5. Fateh, A M A. Eslami, A. and Fahimifar, A. (2017). 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.
6. Lutenegger, A J and Tsuha, C. (2015). Evaluating installation disturbance from helical piles and anchors using compression and tension tests. In: XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires. 373-381.
7. Vickars, R A and Clemence, S P. (2000). *Performance of helical piles with grouted shafts*, in *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*. 327-341.
8. نبی زاده، س. ف. جانعلی زاده، ع. (۱۳۹۵). بررسی عملکرد شمع‌های پیچی پس تزریق در خاک‌های رسی-سیلتی و ماسه‌ای. انجمن علمی مهندسی سازه ایران، ۳، ۵-۱۵.
9. Shah, F and Deng, L. (2015). In-situ Axial Load Tests of Drilled Displacement Steel Piles. In: *Geo Quebec*. Quebec, Canada: 222-230.

10. Terceros Arce, M and Terceros Herrera, M A. (2016). The Use of an Expander Body with Full Displacement Piles in Medium-Dense Sandy Soils. In: Geo-China 2016. Shandong, China: American Society of Civil Engineers (ASCE), 142-151.
11. Kawai, M. Ichikawa, K. and Kono, K. (2017). Development of New Type of Screwed Pile with Large Bearing Capacity and Ecological Driving Method "Tsubasa Pile TM". In: Congrès International de Géotechnique–Ouvrages–Structures. Singapore: Springer, 411-425.
12. Shields, C. (2017). *Fundamentals of Torque Down Piles*. Geo-Institute Dinner Presentation: ASCE. Available at: <https://www.slideshare.net/asceoc/asce-oc-branch-geoinstitute-dinner-presentation-fundamentals-of-torque-down-piles>
13. Das, B M and Shukla, S K. (2013). *Earth anchors*. second edition. USA: J. Ross Publishing. 352.
14. Geotechnics, A. (2005). *Design of screw piles: assessment of pile design methodology*. London: Ove Arup Partners Ltd.
15. International, A. (2013). *Standard test method for deep foundations under static axial compressive load*. ASTM International.
16. Sakr, M. (2014). Retracted: Relationship between Installation Torque and Axial Capacities of Helical Piles in Cohesionless Soils. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), 04014173.
17. Tsuha, C d H C and Aoki, N. (2010). Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(6), 635-647.
18. Eslami, A and Fellenius, B H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 886-904.
19. Randolph, M. (2003). *Ratz version 4-2: load transfer analysis of axially loaded piles*, school of Civil Resource Engineering, University of Western Australia, Perth, Australia:
20. Shojaei, E., Eslami, A., & Ganjian, N. (2021). Self-expanded piles: A new approach to unconventional piles development. *Marine Georesources & Geotechnology*, 39(1), 115-128