

Laboratory Study of the behavior of Helical piles under tension and pressure loading Using the FCV

Hossein SafiKhani¹, Abolfazl Eslami^{2*}, Navid Ganjian³, Amin Bahmanpour⁴

1- Ph.D. student of Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Professor, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent years, the use of Helical piles has become prevalent in the foundation of marine structures exposed to the reciprocal waves of seawater. Moreover, these foundation systems have received particular attention due to several influential parameters, including the limited required time for installation and the ability to be immediately loaded after it. The present study investigates the behavior of three different helical piles under tensile and compressive loading via Frustum Confining Vessel available at Amirkabir University of Technology (FCV-AUT). The under-study piles were single, double, and triple-helix with diameters of 70 and 90 mm and distance ratios of 1.5 and 3. These piles were installed in Bandar Anzali sand, regarding two loose and medium densities by adding 4% humidity. The applied bottom pressure of FCV-AUT was 200 kPa. The results indicated that the helical pile bearing capacity was increased due to soil improvement and densification during its special installation procedure. However, the repeated compressive and tensile loading reduced the capacity of helical piles.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 September 2020

Revise Date: 17 November 2020

Accept Date: 19 January 2021

Keywords:

*Helical piles
FCV physical modeling
Bearing capacity
Tension loading
Compression loading
Reciprocal loading*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.247246.2232>

*Corresponding author: Abolfazl eslami.

Email address: afeslami@aut.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی اثر بارگذاری در حالت رفت و برگشت بر شمع‌های پیچشی پره‌ای در مدل فیزیکی FCV

حسین صفی‌خانی^۱، ابوالفضل اسلامی^{۲*}، نوید گنجیان^۳، امین بهمن‌پور^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- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای در سالهای اخیر در فونداسیون سازه‌های دریایی که در معرض امواج رفت و برگشتی آب دریا قرار دارند، رواج زیادی پیدا نموده است. از طرفی به دلیل زمان اندک مورد نیاز برای نصب در زمین و قابلیت بارگذاری بلافاصله بعد از نصب، سرعت احداث فونداسیون و نصب و تسریع در برپایی سازه اصلی مورد توجه خاص قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای تحت بارگذاری کششی و فشاری، سه تپ شمع پیچشی بصورت تک پره، دو پره و سه پره، با اقطار ۷۰ و ۹۰ میلیمتر و نسبت فاصله بین پره‌ها به قطر آنها در اندازه‌های ۱/۵ و ۳ تحت آزمایش قرار گرفتند. خاک مورد آزمایش ماسه بندر انزلی بوده و با اعمال رطوبت ۴ درصد، در تراکم‌های سست و متوسط ارزیابی‌ها صورت گرفتند. فشار کف اعمال شده در دستگاه فشار همه جانبه مخروطی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT) برابر با ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده است. نتایج نشان داد که اینگونه شمع‌ها در بارگذاری فشاری و کششی رفتار مناسبی داشته و در اثر بهسازی و افزایش تراکم خاک، ظرفیت باربری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. ولیکن رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای در اثر توالی بارگذاری فشاری و کششی، رفتار کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: شمع‌های پیچشی پره‌ای، دستگاه مدل فیزیکی FCV، ظرفیت باربری، بارگذاری رفت و برگشتی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.247246.2232	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.247246.2232	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۰۸/۲۷	۱۳۹۹/۰۶/۱۸
ابوالفضل اسلامی afeslami@aut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

کاربرد شمع‌های پیچشی پره‌ای بیشتر به صورت مهار و برای تحمل نیروی کششی بوده است و نخستین کاربرد شمع‌های پیچشی پره‌ای را نیز می‌توان به استفاده در سازه‌های نگهبان ساحلی نسبت داد که به سال ۱۸۳۳ در انگلستان برمی‌گردد.

علیرغم ناشناخته بودن و عدم وجود روش‌های مرسوم طراحی برای استفاده از این شمع‌ها، استفاده از آنها رو به افزایش است. طبق بررسی‌های پرکو در سال ۲۰۰۹ در سراسر جهان و در چهار قاره، بیش از ۵۰ شرکت در زمینه شمع‌های پیچشی فعالیت کرده‌اند، فقط در ایالات متحده در حدود ۲۰۰ شمع پیچشی پره‌ای اجرا شده است که همین موضوع نشان دهنده اقبال عمومی نسبت به این شمع‌ها بوده است، لذا نیاز به بررسی‌های کامل و جامع، رفتار این شمع‌ها بیش از پیش احساس می‌شود [۱].

تا مدت‌ها تصور بر این بود که این نوع شمع‌ها مناسب برای خاک‌های ریزدانه بوده و به دلیل کوچکی قطرشان در سنگریزه‌ها و زمین‌های درشت‌دانه دارای عملکرد خوبی نبوده است. اما تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۲ توسط دی برنادو^۱ نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای در این زمین‌ها نیز امکان‌پذیر است. او در تحقیق خود شمع‌هایی را که دارای پره‌هایی با قطر مختلف بوده در خاک‌های ریزدانه، درشت‌دانه، سنگریزه‌ای و حتی زمین‌های یخ زده اجرا کرده و نتیجه گرفت که استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای در تمام خاک‌ها نتایج قابل قبولی داشته و شرایط خاک بر قطر مناسب پره‌های متصل به میله مرکزی شمع موثر بوده است و در صورتیکه قطر مناسبی انتخاب شود (قطرهای کوچکتر برای زمین‌های دانه‌ای و قطرهای بزرگ برای زمین‌های ریزدانه)، این شمع‌ها می‌توانند گزینه مناسبی برای تحمل نیروی برکنش و همچنین استقرار و ایمن‌سازی ساختمان‌های سبک در زمین‌های مشکل‌دار باشند [۲].

با توجه به نقش اصلی شمع به عنوان عضو تامین‌کننده ظرفیت باربری حدی مناسب، متغیر سطح مقطع موثر درگیر با خاک نقش اساسی و پررنگ در افزایش ظرفیت باربری دارد. به همین دلیل، فارغ از نحوه اجرا و براساس استاندارد پی بریتانیا^۲ (BS)، شکل سطح مقطع شمع به عنوان یکی از فاکتورهای اصلی طبقه‌بندی شمع‌ها مطرح شده است. فاکتوری که به لحاظ عملکردی نیز در حوزه ایجاد تغییر مکان‌های کوچک و یا بزرگ نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. با توجه به محدودیت‌های مطالعات میدانی بر روی شمع‌های تمام مقیاس از جمله هزینه بالا، دشواری اجرا و نیز عدم کنترل بر تمام شرایط در موارد مختلف، مطالعه بر روی مدل‌های کوچک مقیاس هلیکال^۳ در آزمایشگاه می‌تواند جایگزین خوبی برای مطالعات باشد.

اولین استفاده ثبت شده از یک شمع هلیکال در سال ۱۸۳۶ توسط یک آجرساز و مهندس عمران نابینا به نام الکساندر میچل^۴ بود. در سال ۱۸۳۸ میچل، اختراع خود را در لندن ثبت نمود. میچل این دستگاه را «شمع پیچوار» نامید و اولین استفاده آن برای پهلوگیری کشتی بود. در سال ۱۸۳۸، میچل شمع‌های پیچ وار را برای فنداسیون فانوس دریایی مپلین سندز^۵، بر روی یک ساحل بسیار ناپایدار نزدیک ورودی رودخانه تیمز در انگلستان، استفاده کرد [۱].

اولین نوع از آنالیزهای ابتدایی و معمولی در خصوص شمع‌های پیچشی برای اولین بار توسط تروفیمنکو^۶ و ماروپولشی^۷ در سال ۱۹۶۵ انجام شده است. آنها روش تحلیل ظرفیت باربری منفرد را برای تک هلیکس یک مهار ارائه دادند [۳]. در حالی که آدامز و همکاران در سال ۱۹۷۲ اولین کسانی بودند که این روش را برای مهارهایی با چند پره بکار بردند [۴]. ویکرز^۸ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که ظرفیت باربری شمع پیچشی بدون تزریق دوغاب تقریباً نصف شمع پیچشی تزریق شده بوسیله دوغاب است [۵].

1 Di Bernardo

2 British Standard: Code of Practice for Foundations

3 Helical Piles

4 Alexander Mitchell

5 Meplin sands

6 Trofimenkov

7 Maruipolshii

8 Vickers

نصر^۹ بعد از مطالعات زیاد در خصوص کاربردهای این نوع شمع‌ها در سال ۲۰۰۴ مدعی شد که شمع‌های پیچشی در برابر نیروهای کششی، نیروهای فشاری، بارهای جانبی، و لنگرهای واژگونی نیز عملکرد مناسبی داشته‌اند [۶].

سکر^{۱۰} در سال ۲۰۱۰ پژوهش‌های گسترده‌ای را در کانادا انجام داد. وی آزمایش‌های خود را بر روی دو نوع خاک از جنس ماسه متراکم و خاک حاوی رس‌های یخچالی (سخت و بسیار سخت) در یک سایت بزرگ واقع در آبرتای شمالی انجام داد. بمنظور شناخت پارامترهای موثر بر عملکرد شمع‌های پره‌ای در پژوهش خود از سه تیپ شمع پره‌دار استفاده کرده که پره‌ها و میله مرکزی دارای ضخامت ورقه یکسان اما قطر متفاوت بوده‌اند. وی از کار خود نتیجه گرفت که در هر دو سایت رسی و ماسه‌ای با افزایش قطر پره‌های شمع، علیرغم افزایش دستخوردگی در خاک، ظرفیت باربری شمع افزایش می‌یابد [۷].

یعنی افزایش قطر پره‌ها در هر خاکی سبب بهبود عملکرد شمع می‌شود. در سال ۲۰۱۱، مریفیلد نیز در مورد قطر پره‌های شمع و نسبت فاصله به قطر پره‌های شمع، تحقیقاتی را انجام داد که تا حدودی نتایجی مشابه تحقیقات سکر در سال ۲۰۱۰ به دست آورد. لیکن وی گامی جلو نهاده و برای عملکرد مناسب شمع فاصله بین دو پره را به اندازه سه برابر قطر آنها پیشنهاد داد [۸].

محققینی مثل داس و ژنگ^{۱۱} با ارائه مدلی مشابه (شکل ۱)، ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی را در سه قسمت محاسبه کرده‌اند [۹]. این مدل که به واقعیت بسیار نزدیک است نشان می‌دهد که در صورت انتخاب درست فاصله و قطر پره‌ها در شمع‌های پیچشی، این شمع‌ها در قسمت نوک شمع تا قسمت بدون پره همانند یک شمع با قطر پره‌ها عمل می‌کنند. در محاسبه ظرفیت باری شمع نیاز به پارامترهایی از خاک و شکل شمع می‌باشد. در این مدل نیز همان اصول پابرجا بوده و تنها تغییر آن تعیین مساحت نوک و جدار شمع است. لذا محققین مذکور ظرفیت باری را به شرح زیر محاسبه نموده‌اند:

$$Q_u = Q_h + Q_t + Q_{sh} \quad (1)$$

Q_u : ظرفیت نهایی شمع (kN)

Q_h : مقاومت برشی بسیج شده در طول سطح گسیختگی استوانه‌ای از نوک تا قسمت بدون پره (kN)

Q_t : ظرفیت باربری نوک شمع (kN)

Q_{sh} : مقاومت بسیج شده در طول قسمت بدون پره میله مرکزی شمع (kN)

این مدل نشان می‌دهد که یک شمع پیچشی می‌تواند جایگزین شمع با قطر چند برابر میله مرکزی اصلی خود شود.

راوات و گوپتا^{۱۲} در سال ۲۰۱۷ ظرفیت کشش در شمع‌های پیچشی پره‌ای را از طریق مدلسازی عددی بررسی نموده و متوجه شدند که این ظرفیت متناسب با افزایش تعداد پره‌ها، افزایش می‌یابد و همچنین افزایش فاصله و قطر پره‌ها تا یک حد بحرانی تاثیر داشته و از آن به بعد بی‌تاثیر خواهد بود [۱۰].

در تحقیق حاضر به منظور بررسی رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای، سه تیپ شمع پیچشی بصورت تک پره، دو پره و سه پره، با اقطار ۷۰ و ۹۰ میلیمتر و نسبت فاصله پره‌ها به قطر آنها در اندازه‌های ۱/۵ و ۳ استفاده شده است، که بادر نظر گرفتن شرایط ماسه بندر انزلی و اعمال رطوبت ۴ درصد، در تراکم‌های سست و متوسط و در شرایط اعمال فشار کف ۲۰۰ کیلو پاسکال اقدام به نمونه‌سازی در دستگاه فشار همه جانبه مخروطی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT) گردید.

۲- مدل سازی فیزیکی در دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV) ^{۱۳}:

مدل سازی فیزیکی در واقع تکرار یک پدیده و رویداد بوده تا با آنچه در واقعیت و در نمونه واقعی روی می دهد از دقت بالایی برخوردار بوده و قابل مقایسه باشد [۱۱]. بطور کلی مدل، یک نسخه با مقیاس کوچک شده از سازه اصلی است. رفتار هر دو پدیده (مدل و سازه اصلی) می بایست مشابه یکدیگر بوده و این شباهت با استفاده از قوانین مقیاسی (آنالیز ابعادی) مناسب برقرار شود [۱۲]. مدل سازی فیزیکی یک روش کم هزینه برای بررسی عملکرد این نوع پی ها و آزمایش های درجا بوده که می تواند یک مکمل مناسب برای روش هایی عددی واقع شود. در مطالعات انجام شده در گذشته، با وجود آنکه هزینه انجام آزمایش ها بر روی سانتریفیوژ در مقابل هزینه انجام آزمایش ها بر روی نمونه تمام مقیاس بسیار کم بوده ولی هنوز نیز این آزمایش ها با دو مشکل در دسترس بودن دستگاه و نیز هزینه بالا آزمایش مواجه هستند [۱۳]. بر اساس ضوابط بیان شده زمانی که تشابه در شرایط تنش بین مدل و نمونه واقعی برقرار می شود رابطه بین مدل و نمونه اصلی برقرار خواهد بود که در آن p_p ابعاد نمونه اصلی و p_m ابعاد نمونه مدل هستند. ضریب N نیز ضریب مقیاس و یا ضریب تشبیه برای کاهش مقیاس نمونه اصلی و تبدیل به مدل فیزیکی مورد نظر خواهد بود، که می بایست بر تمام پارامترها و ابعاد نمونه اعمال شود. مضرب یا درصد اعمال این ضریب با استفاده از آنالیزهای ابعادی مشخصات و با انجام محاسبات ریاضیاتی مشخص برای هر پارامتر متفاوت است [۱۴].

علیرغم وجود مشکلاتی از قبیل دسترسی محدود به دستگاه سانتریفیوژ، هزینه بالا و مشکلات مربوط به مدلسازی در حالت چرخشی، دستگاه فشار همه جانبه مخروطی (FCV) قادر است با توجه به شکل مخروطی ناقص و اعمال فشار در کف آن و در ناحیه کنترلی مرکزی خود، میدان تنشی ایجاد کند که از مقدار صفر در بالای دستگاه تا مقدار مورد نظر در عمق با گرادیان تنش تقریباً خطی که مطابق با شرایط تنش در واقعیت است، تغییر کند. این مساله مهمترین مزیت دستگاه FCV است، زیرا با خطای کمی می توان رفتار مدل را به رفتار تمام مقیاس تعمیم داد. علت اصلی انتخاب شکل مخروطی دستگاه در نظر گرفتن تاثیرات جداره مایل آن می باشد بدین صورت که جداره مایل دستگاه، سبب ایجاد نیرویی در نمونه خاک داخل آن، متناسب با فشار اعمالی کف می گردد که در نتیجه تاثیر آن می توان تنشهای درون دستگاه را به مقادیر بالایی افزایش داد، همین امر دلیل اصلی برتری دستگاه مخروطی نسبت به استوانه ای است. در این دستگاه خاک مورد نظر در داخل آن ریخته شده و فشار محدود کننده از انتهای مخزن به وسیله پیستون به خاک اعمال می گردد. از آنجا که شکل فیزیکی دستگاه به صورت مخروط ناقص می باشد، تنش افقی به تناسب افزایش عمق اضافه می شود. نحوه توزیع تنش دستگاه فشار همه جانبه مخروطی بصورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. به دلیل آنکه قسمت بالایی دستگاه به طور مستقیم با هوای آزاد در ارتباط بوده، دارای تنش برابر صفر است. در این دستگاه با توجه به شکل و نحوه طراحی آن، گرادیان تنش به صورت خطی با پیشروی به کف دستگاه افزایش می یابد. این نحوه توزیع تنش مهم ترین مزیت این دستگاه نسبت به محفظه تحکیم است. فشار وارد شده از کف در دستگاه FCV به وسیله یک دیافراگم لاستیکی اعمال می شود که این دیافراگم خاک را از محفظه هیدرولیکی جدا می نماید. از دیگر مزیت های اصلی دستگاه FCV، با تغییر میزان فشار اعمالی توسط غشای لاستیکی از کف، می توان شیب تنش ایجاد شده در خاک را کاهش یا افزایش داد.

هوروث^{۱۴} و همکاران به منظور بررسی عملکرد دستگاه FCV، از آزمایش نفوذ مخروط (CPT) با ابعاد استاندارد و سرعت ۱ سانتی متر بر ثانیه استفاده نمودند [۱۲]. در این آزمایش مقادیر مقاومت نوک، مقدار کل نیروی اعمالی و نیز مقدار جابجایی مخروط به صورت پیوسته در خاک اندازه گیری شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که نمودارها با کمترین تنش کف (۵ kPa) به طور چشم گیری به صورت خطوط مستقیم هستند. این امر به دلیل سطح تنش متناظر با حالت طبیعی خاک است. برای فشارهای کف بالاتر، نمودارها از خط مستقیم منحرف شده، به سمت بالا تقعر پیدا می کنند. عمق و یا طول نفوذ مورد نیاز برای توسعه کامل تنش های همه جانبه در محور، به مشخصات خاک، اندازه بازشدگی فوقانی، زاویه مخروط و مقاومت اصطکاکی بین خاک و دیواره دستگاه بستگی دارد.

سدران^{۱۵} در سال ۱۹۹۹ با تغییر در شیوه بارگذاری کف دستگاه از حالت پیستونی به حالت غشایی و مقایسه نتایج این دو حالت بارگذاری به موارد زیر دست یافت [۱۴].

- توزیع تنش در امتداد خط مرکزی دستگاه، برای نمونه با غشای لاستیکی یکنواخت تر از نمونه پیستونی است.

13 Frustum Confining Vessel

14 Horvath

15 Sedran

- تنش‌های اندازه‌گیری شده در دستگاه پیستونی، تمرکز تنش بالا را در محل اتصال پیستون به کف دستگاه نشان می‌دهد، که با نوعی مکانیزم قوس‌زدگی در دهانه بالایی FCV همراه است (شکل ۳).

۱-۲- دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT)

دستگاه FCV موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر بزرگترین دستگاه از این نوع در کشور هست. این دستگاه شامل یک مخروط ناقص و نیز دو استوانه در بالا و پایین مخروط است. قسمت مخروط ناقص دارای قطر ۱۳۵ cm در قسمت پایین (دهانه بزرگ‌تر) و قطر ۳۰ cm در قسمت بالا (دهانه کوچک‌تر) و نیز ارتفاع ۱۳۰ cm هست. ابعاد بزرگ این دستگاه نسبت به سایر مدل‌های دیگر موجود، باعث می‌شود تا مقدار خطا ناشی از مقیاس و نیز شرایط مرزی تا حد امکان کاهش یابد. این دستگاه برای سهولت در فرایند ساخت نمونه، به دو قسمت تقسیم شده، که محل اتصال دو قطعه در فاصله ۷۰ cm از کف دستگاه است. اتصال دو قسمت به وسیله پیچ صورت گرفته تا در هنگام اجرا و ساخت نمونه، به راحتی جدا و متصل شود. برای حفظ صلبیت بدنه دستگاه، از ورق‌های فولادی با ضخامت ۱۰ cm استفاده شده است [۱۵].

در قسمت انتهایی دستگاه ورق فولادی به ضخامت ۱۵ cm نصب شده، تا غشای لاستیکی بین آن و کف دستگاه قرار گیرد. برای این اتصال از ۲۴ پیچ با قطر ۲۲ mm استفاده می‌شود. در دستگاه FCV برای ایجاد فشار لازم در غشای پلاستیکی و به دنبال آن انتقال فشار از غشا به خاک، از فشار هیدرولیکی استفاده شده است. برای این کار هوای فشرده شده توسط کمپرسور، وارد مخزن هوا-آب می‌شود و با وارد کردن فشار هوا به مخزن، آب با فشار وارد فضای بین صفحه فلزی و غشا شده، و فشار آب موجود به دلیل انعطاف پذیر بودن غشا، از انتها به خاک اعمال می‌شود. شکل ۴ تصویر شماتیک از دستگاه FCV-AUT و نیز روند اعمال فشار کف را نمایش می‌دهد. کمپرسور مورد استفاده دارای ظرفیت ۱۱۰ لیتر بوده که دارای یک کلید خودکار است و می‌تواند فشاری معادل ۱۰ bar ایجاد کند. این کمپرسور در فشارهای زیر ۸ bar روشن شده و در فشارهای بالای ۱۰ bar خاموش می‌شود. وظیفه کمپرسور تعبیه شده، کنترل فشار هوای خروجی و نیز اعمال فشار به صورت پله‌ای است. یک نانومتر ۱۰ bar برای قرائت فشار ورودی کمپرسور، فشار درون مخزن هوا-آب و فشار کف دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است. برای ایجاد ارتباط بین کمپرسور، مخزن آب و غشای لاستیکی کف دستگاه از شیلنگ‌های فشارقوی هیدرولیکی استفاده شده است.

۲-۲- تجهیزات مربوط به بارگذاری

برای اعمال بارگذاری از یک جک رفت و برگشتی ساخته شده با مشخصات ذیل استفاده شده است:

قابلیت بارگذاری تا ۲ تن - اعمال فرکانس تا ۰/۵ هرتز - حداکثر جابجایی ۲۰۰ میلی‌متر - حداقل سرعت جابجایی ۰/۰۰۱ سانتی‌متر بر ثانیه - حداکثر سرعت جابجایی ۲ سانتی‌متر بر ثانیه - امکان بارگذاری فشاری و کششی - امکان بارگذاری در دو حالت کنترل تنش و کنترل کرنش (شکل ۵). برای تعیین توزیع تنش در دو راستای قائم و افقی در مرکز دستگاه از سنسورهای فشار سنج استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع تنش تا مقدار قابل توجهی خطی بوده است که این امر نشان دهنده عملکرد مناسب این دستگاه در مدل سازی فیزیکی پی‌های عمیق می‌باشد (شکل ۶).

۳- نمونه‌سازی و انجام آزمایش

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها ماسه بندر انزلی بوده که با توجه به آزمایش دانه‌بندی انجام شده به روش طبقه‌بندی متحد در دسته ماسه‌های بد دانه‌بندی شده (SP) جای می‌گیرد. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد نظر در شکل شماره ۷ و جدول شماره ۱ ارائه شده است. کلیه شمع‌های مورد استفاده در این آزمایشات، دارای میله مرکزی به قطر ۳۲ میلی‌متر با قطر پره‌های متغیر به مقدار ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۸). همچنین به منظور بررسی اثر تعداد پره‌ها، شمع‌ها بصورت تک‌پره، دو پره و سه‌پره ساخته شده‌اند. کلیه آزمایش‌ها بر روی ماسه بندر انزلی و دانسیته‌های مختلف با درصد رطوبت ۴ درصد صورت گرفته و عمق نفوذ در کلیه آزمایش‌ها ۷۵۰

میلی متری در نظر گرفته شده است. آزمایش بارگذاری فشاری و کششی به ترتیب مطابق با آیین نامه ASTM-1143 و ASTM-3689 انجام شدند. به منظور انجام آزمایش بارگذاری کششی از یک قطعه رابط جهت اتصال Load Cell و شمع استفاده گردید.

بارگذاری به صورت گام به گام انجام شد. بطوریکه در هر گام تقریباً ۵ درصد بار نهایی تخمینی به شمع اعمال می گردید. بار اعمالی در هر گام به مدت ۴ دقیقه ادامه داشت، تا مقدار تغییر مکان سر شمع تقریباً ثابت گردد. در حین بارگذاری با استفاده از Load Cell و LVDT مقادیر بار، جابجایی و زمان توسط سیستم دیتالاگر ثبت و به صورت هم زمان در نمایشگر مشاهده و فرآیند آزمایش کنترل می گردید. بمنظور انجام دقیق تست ها، تعداد ۱۰ تست جهت کالیبراسیون دستگاه در متغیرهای مختلف (از نظر میزان تراکم، رطوبت خاک، اعمال نیروی فشاری، کششی و یا به صورت رفت و برگشتی) انجام شد. در اجرای شمع های پیچشی پره ای، دستگاه Torque Motor بر روی دهانه بالایی دستگاه FCV نصب گردید. سپس دستگاه با استفاده از گشتاور لازم و نیروی محوری ثابت شمع را تا عمق مورد نظر به داخل خاک به صورت پیچشی می راند. نکته حائز اهمیت توانایی دستگاه Torque Motor در اندازه گیری گشتاور لازم جهت پیچش شمع به داخل خاک است. برای انجام آزمایش کششی از یک کلاهک مخصوص که به بالای شمع پیچ می گردد، استفاده شده است (شکل ۹).

۴- صحت سنجی

به طور کلی یکی از متدهایی که برای راستی آزمایی نتایج آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی بکار برده می شود، روابط تحلیلی و تجربی می باشد. در این پژوهش با استفاده از دستورالعمل راهنمای مهندسی پی کانادا (CFEM)، ظرفیت باربری اتکایی و اصطکاکی شمع های مورد آزمایش با مدنظر قرار دادن پارامترها و ابعاد هندسی شمع و پره ها مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. آیین نامه مهندسی پی کانادا برای محاسبه ظرفیت باربری اتکایی و اصطکاکی از معیار تنش مؤثر و حاصل ضرب آن در یک ضریب تجربی استفاده می کند [۱۶]. ظرفیت باربری کل از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q_u = Q_t + Q_s = R_t A_t + R_s A_s \quad (2)$$

Q_u : ظرفیت باربر نهایی شمع (kN)

Q_t : ظرفیت باربری اتکایی شمع (kN)

Q_s : ظرفیت باربری اصطکاکی شمع (kN)

پارامترهای R_t و R_s به ترتیب مقاومت واحد باربری اتکایی (kN/m^2) و مقاومت واحد اصطکاک جداری (kN/m^2) می باشد:

$$R_t = N_t \cdot \sigma'_z \quad (3)$$

$$R_s = \beta \cdot \sigma'_z \quad (4)$$

که ضرایب تجربی β و N_t از جدول شماره ۲ دستورالعمل راهنمای مهندسی پی کانادا به دست می آید. برخی از محققین با توجه به قطر میله مرکزی شمع و ابعاد پره ها در شمع های پیچشی و با در نظر گرفتن رانشی بودن شمع و همچنین ایجاد دستخوردگی خاک پیرامون شمع، این گونه شمع ها را در رده شمع های با تغییر مکان محدود تقسیم بندی می کنند. بدین ترتیب با استفاده از جدول شماره ۲ و با توجه به تراکم ماسه سست و متوسط، مقادیر β به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ و N_t به ترتیب ۲۰ و ۴۰ منظور شده است.

$$Q_t = A_t * N_t * \sigma'_v \quad (5)$$

$$Q_{s.shaft} = \beta * p_{sh} * L_{sh} \quad (6)$$

$$Q_{s.helix} = \beta * \bar{\sigma}'_v * p_{hel} * L_{hel} \quad (7)$$

Q_t : ظرفیت باربری اتکایی پره شمع (kN) به روش CFEM

A_t : مساحت پره تحتانی (m^2)

$Q_{s,shaft}$: ظرفیت باربری جدار میله مرکزی (kN)

L_{sh} : طول میله مرکزی شمع از تراز روی زمین تا پره فوقانی (m)

p_{sh} : محیط میله مرکزی شمع (m)

$\bar{\sigma}'_v$: متوسط تنش مؤثر در محدوده مورد نظر (kN/m^2)

$Q_{s,helix}$: ظرفیت باربری جدار استوانه گسیختگی (kN)

p_{hel} : محیط پره (m)

L_{hel} : فاصله مابین پره فوقانی تا تحتانی (m)

مطابق پژوهش‌های سایر محققین، در شمع‌های معمولی پس از رسیدن تغییر مکان‌ها به حد معینی (در حدود ۵٪ تا ۱۵٪ قطر پره شمع)، دیگر افزایش بار محسوسی مشاهده نشده است که این به منزله گسیختگی خاک تلقی می‌شود [۱۷]. لیکن در شمع‌های پیچشی پره‌ای مورد مطالعه در این تحقیق، گسیختگی در تغییر مکان معادل ۳۰ تا ۳۵٪ قطر پره‌ها مشاهده شده است. بمنظور مقایسه نتایج و محاسبات تحلیلی، بحث و بررسی در محدوده تغییر مکان معادل ۵٪ تا ۱۵٪ قطر پره صورت گرفته است. خلاصه نتایج اعتبار سنجی در جدول شماره ۳ آمده است و همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از آزمایش در دستگاه FCV-AUT در مقایسه با نتایج تحلیلی از تقریب قابل قبولی برخوردار است.

۵- بحث در نتایج

۵-۱- آزمایش تکرارپذیری

به منظور کنترل تکرارپذیری بودن آزمایشات در دستگاه FCV-AUT تعداد ۴ آزمون در تراکم متوسط و در حالت‌های کششی و فشاری انجام شد که نتایج این آزمون‌ها در شکل شماره (۱۰) آمده است. در بررسی نمودار تست‌های انجام شده برای صحت تکرارپذیری مشاهده می‌شود که در تمام آزمایشات در انتهای نمودار (حد گسیختگی خاک) نمودارها تقریباً تطابق کاملی دارند. در آزمایشات تحت بارگذاری کششی در محدوده تغییر مکان‌های متناظر با ۱۵٪ و ۳۰٪ قطر پره شمع‌ها، تقریباً انطباق کامل داریم (محدوده‌هایی که برای محاسبات و صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفته است). در آزمایشات فشاری هم بدلیل تاثیر اعمال فشار کف در دستگاه FCV و وجود اجتناب‌ناپذیر خطاهای بسیار اندک انسانی و دستگاهی، اختلافاتی بین دو تست ایجاد می‌شود ولی همانطور که ملاحظه می‌فرمایید این اختلاف در محدوده فوق‌الذکر در حد کمتر از ۱۰٪ است که معقول بنظر می‌رسد و روند آزمایش‌ها یکسان است. زارع و اسلامی^{۱۶} [۱۵] دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی موجود در دانشگاه صنعتی امیرکبیر را راه‌اندازی کردند و بیان کردند که با توجه به قابلیت شبیه‌سازی شرایط واقعی تنش و افزایش تدریجی آن با عمق، آزمایش‌های انجام شده در این دستگاه به منظور مطالعه در خصوص رفتار شمع‌ها در شرایط مختلف تکرارپذیرند. ضرابی و اسلامی^{۱۷} [۱۸] به بررسی تاثیر روش‌های مختلف نصب بر ظرفیت باربری شمع‌ها، و خزایی^{۱۸} [۱۳] به بررسی تاثیر مشخصات هندسی شمع‌های پیچشی پره‌ای بر روی ظرفیت باربری آنها، در دستگاه مدلسازی فیزیکی FCV-AUT پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که آزمایش‌های انجام شده در دستگاه FCV-AUT تکرارپذیری مناسبی دارند.

۵-۲- بررسی رفتار شمع در نمودار بار- تغییر مکان و معیار گسیختگی:

یکی از نکات بارز که در رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای دیده می‌شود، این است که در این شمع‌ها از ابتدا تا انتهای آزمایش که تغییر مکان شمع محدود به ۵۰ درصد قطر پره‌ها می‌شود، روند افزایش بار همچنان ادامه دارد. اما مشاهده شد که پس از عبور از تغییر مکان حدود ۳۰ درصد قطر پره‌ها، شیب روند افزایش بار کاهش یافته و مقدار جابجایی شمع در هر گام بارگذاری بسیار افزایش یافته است.

¹⁶ Zare and Eslami

¹⁷ Zarrabi and Eslami

¹⁸ Khazaei

به عبارتی شاید بتوان معیار گسیختگی شمع‌های پیچشی پره‌ای را تغییر مکان شمع در حدود ۳۰ درصد قطر پره شمع بیان کرد. علت آن را می‌توان در مکانیزم باربری این شمع‌ها دانست، چرا که این شمع‌ها به واسطه وجود پره‌ها عملکرد اتکایی داشته و مقاومت جداری خیلی مؤثر نبوده است و با توجه به روش اجرای آن‌ها مقدار جابجایی بیشتری برای فعال‌سازی مقاومت اتکایی پره‌ها نیاز است.

خلاصه نتایج بدست آمده از آزمایشات بنابر بررسی نمودارهای شماره ۱۱ الی ۱۶، در تغییر مکان معادل ۳۰ درصد قطر پره (به عنوان معیار گسیختگی) در جدول شماره ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شمع تک پره اختلافی زیادی بین ظرفیت فشاری و کششی وجود ندارد، اما در شمع‌های دو و سه پره با افزایش تعداد پره اختلاف بین ظرفیت فشاری و کششی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. علت این امر را می‌توان افزایش میزان دست‌خوردگی خاک در نواحی فوقانی در حین اجرای شمع‌های پیچشی پره‌ای دانست که تأثیر بسزایی بر ظرفیت اصطکاکی و به‌ویژه اتکایی شمع در حین کشش دارد. همان‌طور که نتایج تایید می‌کند، افزایش تعداد پره یکی از عوامل افزایش دست‌خوردگی خاک در نواحی بالایی است. عامل دیگر را می‌توان وجود سطح آزاد در مسیر اعمال بار دانست، بطوریکه در حالت آزمایش فشاری وقتی بار به شمع اعمال می‌شود، شمع در راستای بارگذاری و در مسیر آن تمایل به حرکت دارد که مسیر شمع به‌وسیله خاک مسدود شده و لذا فشار اعمالی به خاک اطراف و زیر شمع منتقل می‌شود، این مسئله برای کشش در دستگاه فشار همه‌جانبه صادق نیست و وقتی شمع در راستا و مسیر اعمال نیروی کششی تمایل به حرکت رو به بالا دارد و نیرو فقط به خاک اطراف منتقل می‌شود، زیرا در بالای شمع خاکی وجود نداشته و سطح آزاد قرار دارد.

افزایش تراکم از حالت سست به تراکم متوسط باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری اینگونه شمع‌ها شده است. از نظر ظرفیت باربری، ظرفیت کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد کمتر از ظرفیت فشاری آنها بوده است، که در شمع تک پره این اختلاف به ۱۰ تا ۳۰ درصد می‌رسد. مشاهده گردید که افزایش تعداد پره و افزایش قطر پره در شمع‌های پیچشی پره‌ای، باعث افزایش ظرفیت فشاری و کاهش ظرفیت کششی می‌شود. همچنین در شمع‌های با قطر پره یکسان، افزایش تعداد پره همراه با کاهش نسبت فاصله به قطر باعث کاهش ظرفیت‌های فشاری و کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای می‌شود.

همچنین در شمع‌های بلند، درصد بیشتری از بار را اصطکاک جانبی تحمل می‌کند، ولی در شمع‌های کوتاه این درصد کاهش می‌یابد، بنابراین سهم مقاومت نوک محسوس‌تر است. از این‌رو در شمع‌های کوتاه، ظرفیت کششی با ظرفیت فشاری، اختلاف زیادی دارد. دقت در منحنی‌های بار-تغییر مکان شمع‌های پیچشی پره‌ای نشان می‌دهد که بار به‌صورت پیش‌رونده با جابجایی زیاد می‌شود، با توجه به مطالب گفته‌شده، مشخص است که ظرفیت نوک شمع در حال بالا رفتن است و ظرفیت اولیه جداری که به محض حرکت شمع ظاهر می‌شود، مقدار زیادی نیست. این موضوع مؤید این است که ظرفیت این مدل شمع در آزمایش کشش و فشار در FCV-AUT متفاوت بوده و اختلاف زیاد است. در بررسی‌های بعمل آمده مشخص گردید که افزایش نسبت فاصله پره به قطر پره (S/D)، موجب کاهش ظرفیت کششی در شمع‌های پیچشی پره‌ای شده است و که با کاهش حدوداً (۴۵-۷۵) درصدی همراه بوده است، که یکی از دلایل آن دست‌خوردگی و ایجاد فضای خالی در بالای پره‌ها می‌باشد.

با مقایسه نتایج آزمایش می‌توان بیان کرد که انجام آزمایش بارگذاری فشاری و کششی به‌طور رفت و برگشتی توامان، یا عبارتی انجام آزمایش کششی پس از اتمام آزمایش فشاری می‌تواند بر روی ظرفیت کششی نهایی شمع پیچشی پره‌ای اثر گذار باشد، بطوریکه اثر انجام بارگذاری رفت و برگشتی، ظرفیت کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای را کاهش داده است (جدول شماره ۵).

۶- جمع‌بندی نتایج

در تحقیق حاضر به منظور بررسی رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای، شمع‌های پیچشی بصورت تک پره، دو پره و سه پره، با اقطار پره ۷۰ و ۹۰ میلیمتر و نسبت فاصله پره‌ها به قطر آنها در اندازه‌های ۱/۵ و ۳ استفاده شده است. خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه بندر انزلی است و با اعمال رطوبت ۴ درصد، در تراکم‌های سست و متوسط و در شرایط اعمال فشار کف ۲۰۰ کیلو پاسکال اقدام به نمونه‌سازی در دستگاه فشار همه‌جانبه مخروطی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (FCV-AUT) گردید. با اعمال نیرو بصورت کشش و فشار، رفتار گسیختگی و ظرفیت باربری این شمع‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت، که نتایج آن به شرح زیر است:

- نتایج نشان داد که انتخاب معیار گسیختگی شمع‌های پیچشی پره‌ای در تغییر مکان معادل تقریبی ۳۰ درصد قطر پره شمع، انتخاب مناسبی خواهد بود.
- با متراکم شدن خاک ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی پره‌ای افزایش یافت. به طور کلی، ظرفیت کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای کمتر از ظرفیت فشاری آنها بوده است، که در شمع تک پره این اختلاف کمتر است.
- مشاهده گردید که افزایش تعداد پره و افزایش قطر پره در شمع‌های پیچشی پره‌ای، باعث افزایش ظرفیت فشاری و کاهش ظرفیت کششی می‌شود. همچنین در شمع‌های با قطر پره یکسان، افزایش تعداد پره همراه با کاهش نسبت فاصله به قطر باعث کاهش ظرفیت‌های فشاری و کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای می‌شود.
- نتایج تحلیلی به روش CFEM تطابق مناسبی با نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.
- در بررسی‌های بعمل آمده مشخص گردید که افزایش نسبت فاصله پره به قطر پره (S/D)، موجب کاهش ظرفیت کششی در شمع‌های پیچشی پره‌ای شده، که یکی از دلایل آن دست‌خوردگی و ایجاد فضای خالی در بالای پره‌ها می‌باشد.

سپاسگزاری

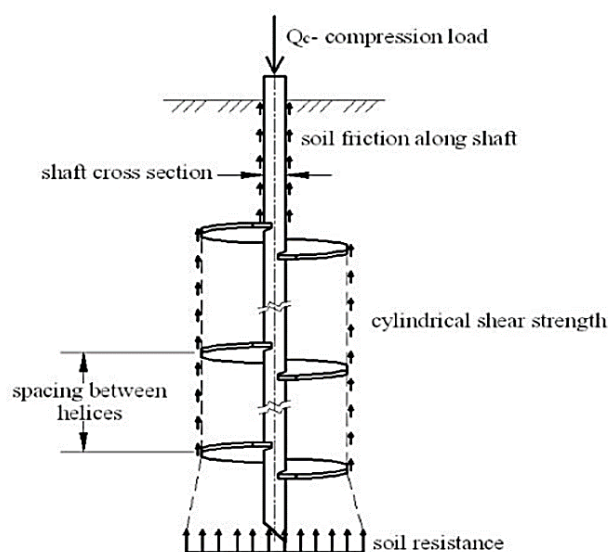
بدین وسیله از همکاری صمیمانه مدیریت و کارکنان محترم دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، و به ویژه مسئول و پرسنل آزمایشگاه مدلسازی فیزیکی این دانشکده نهایت قدردانی و سپاسگزاری به عمل می‌آید.

مراجع

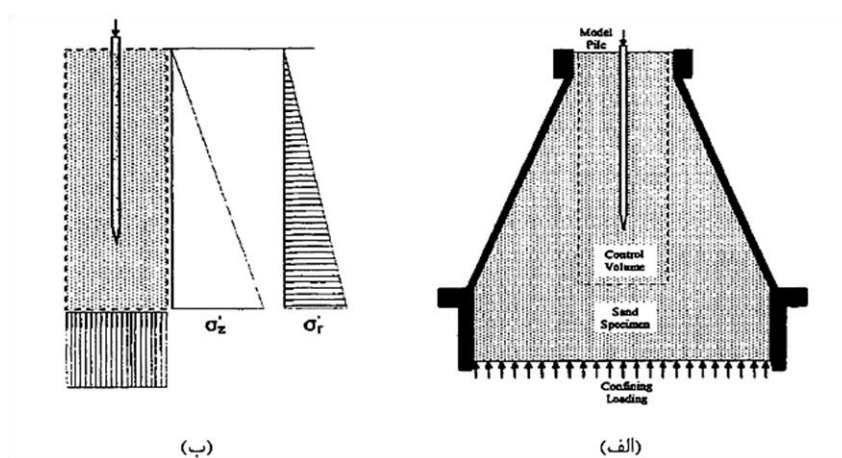
- [1] Perko, H. (2009). *A practical guide to design and installation*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken. NJ. USA.
- [2] Di Bernardo, G. (2012). *Helical pile deck foundation*. New jersey deck boulder. USA.
- [3] Trofimenkov, J.G. and Maruipolshii, L.G. (1965). *Screw piles used formats and foundations*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. vol.2, pp.328–332.
- [4] Adams, J.I. and Klym, T.W. (1972). *A study of anchors for transmission tower foundations*. Canadian Geotechnical Journal, 9(1), 89–104.
- [5] Vickers, R. and Clemence, S.P. (2000). *Performance of helical piles with grouted shafts*. New Technological and Design Developments in Deep Foundations. American Society of Civil Engineers. USA. pp.327–341.
- [6] Nasr, M.H. (2004). *Large capacity screw piles*. In: Proceedings of the International Conference. Future Vision and Challenges for Urban Development. Cairo, Egypt, 20–22 December, pp.1–15.
- [7] Sakr, M. (2010). *High capacity helical piles; a new dimension for bridge foundations*. In: Proceedings of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Niagara Falls, Canada, 2010.
- [8] Merifield, R. S. (2011). *Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp 704-712.
- [9] Zhang, D.J.Y. (1999). *"Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils"*. MSc Thesis, Geotechnical Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alta.
- [10] Rawat, S. and Gupta, A.K. (2017). *Numerical modelling of pullout of helical soil nail*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9 (2017) 648e658.
- [11] Abranj, A. (2013). *Investigating the effects of run on deep PC performance using a pressure device conical immersive (FCV)*. MSc in Civil Engineering. Amirkabir University of Technology.
- [12] Horvath, R.G. (1996). Frustum for testing model piles. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No.3, June, pp. 499-504.
- [13] Khazaei, J. (2016). Study of helical piles behavior via frustum confining vessel. PhD Thesis. Amirkabir University of Technology.
- [14] Sedran, G. (1999). Experimental and analytical study of a frustum confining vessel, Doctoral Thesis, McMaster University.
- [15] Zare, M. and Eslami, A. (2014). Study of deep foundations performance by frustum confining vessel (FCV). PhD Thesis. Amirkabir University of Technology.
- [16] CFEM, (2006). Canadian foundation engineering manual, Canadian Geotechnical Society, Technical Members of Foundations, BiTech Publishers Ltd., Richmond, EC.

- [17] Beigi.F. (2018). Comparison of the behavior of various candle models in a comprehensive pressure device cone, University of Amirkabir (FCV-AUT). MSc in Civil Engineering. Amirkabir University of Technology.
- [18] Zarrabi, M. and Eslami, A. (2016). Behavior of piles under different installation effects by physical modeling. Int. J. Geomech., 04016014.ASCE.
- [19] Nabizadeh,F.(2016). Laboratory study and performance accuracy of screw piles in sandy soils. Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE).Vol.3, No.3, pp.5-15

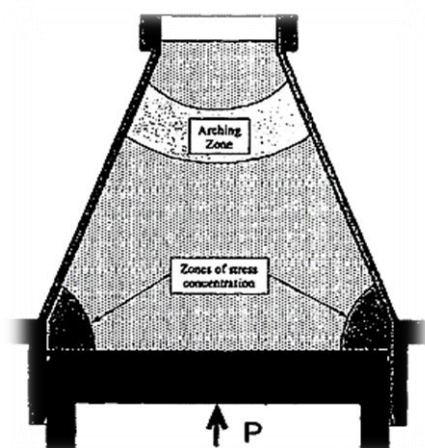
فهرست شکل‌ها:



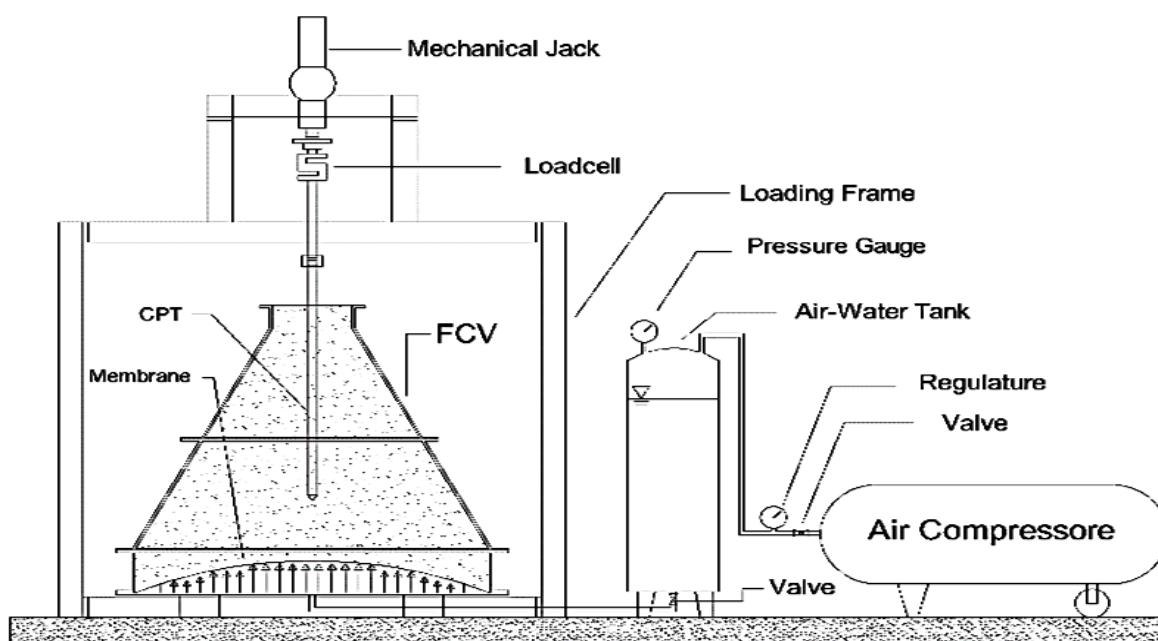
شکل ۱: مقاومت بسیج شده در بدنه شمع پیچشی پره‌ای [۹]



شکل ۲: دستگاه مخروط فشاری همه‌جانبه؛ (الف) شکل شماتیک دستگاه، (ب) نحوه توزیع تنش در دستگاه [۱۴]



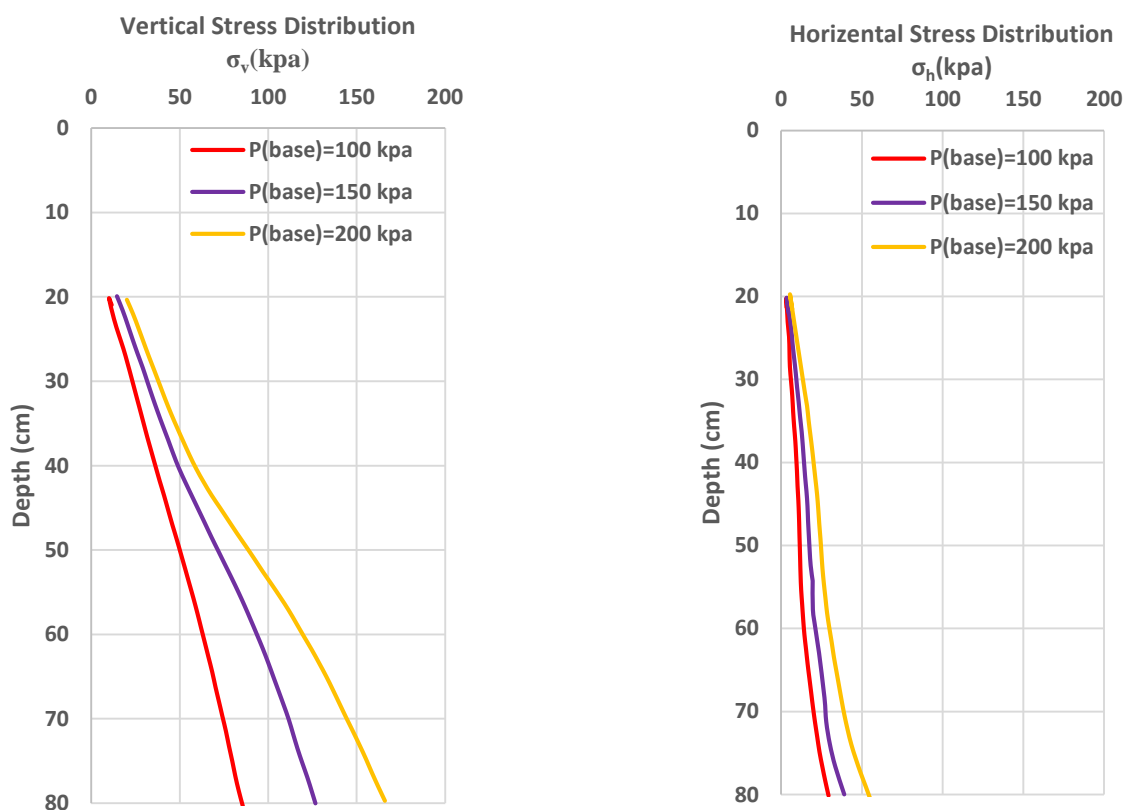
شکل ۳: تمرکز تنش و قوس زدگی در FCV پیستونی مک مستر [۱۴]



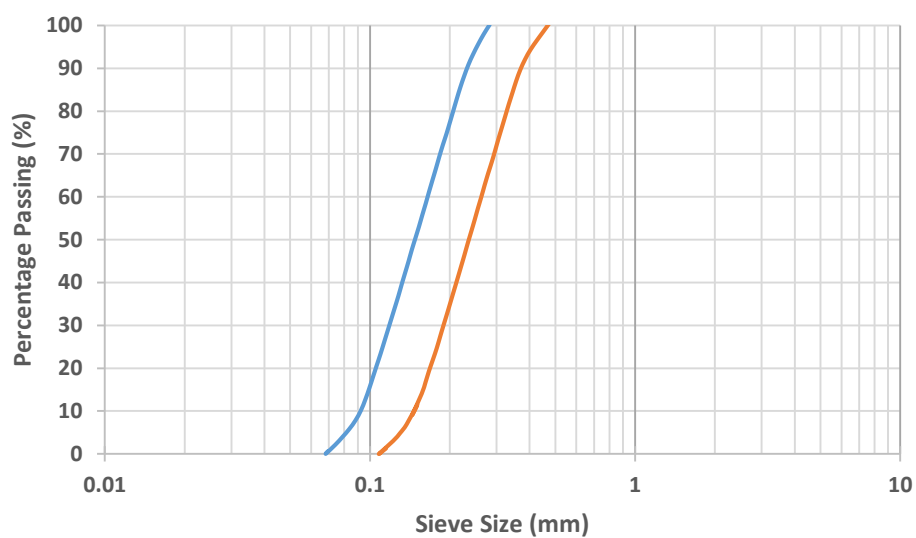
شکل ۴: نمایی شماتیک از سیستم اعمال فشار کف در دستگاه FCV-AUT



شکل ۵: سیستم بارگذاری دستگاه FCV دانشگاه امیرکبیر



شکل ۶: نمودار تغییرات تنش اندازه گیری شده با عمق در دستگاه FCV: (الف) تغییرات تنش افقی و (ب) تغییرات تنش قائم (FCV) [۱۸]



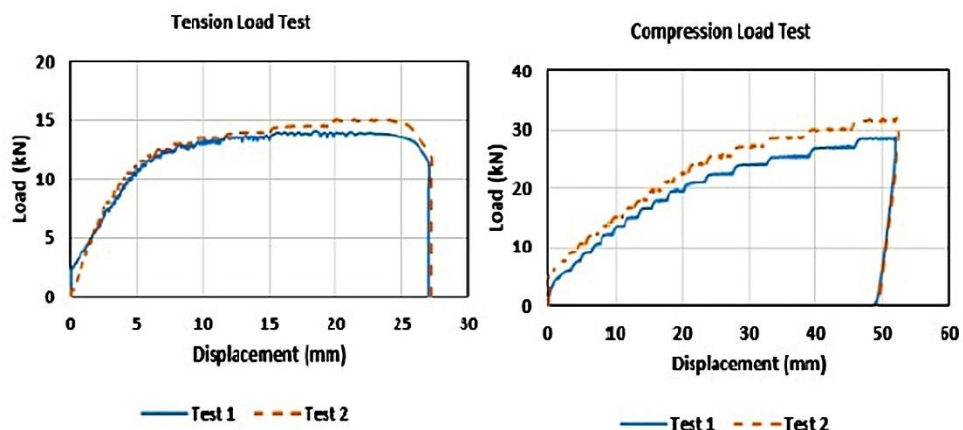
شکل ۷: منحنی دانه‌بندی ماسه بندرانزلی [۱۷]



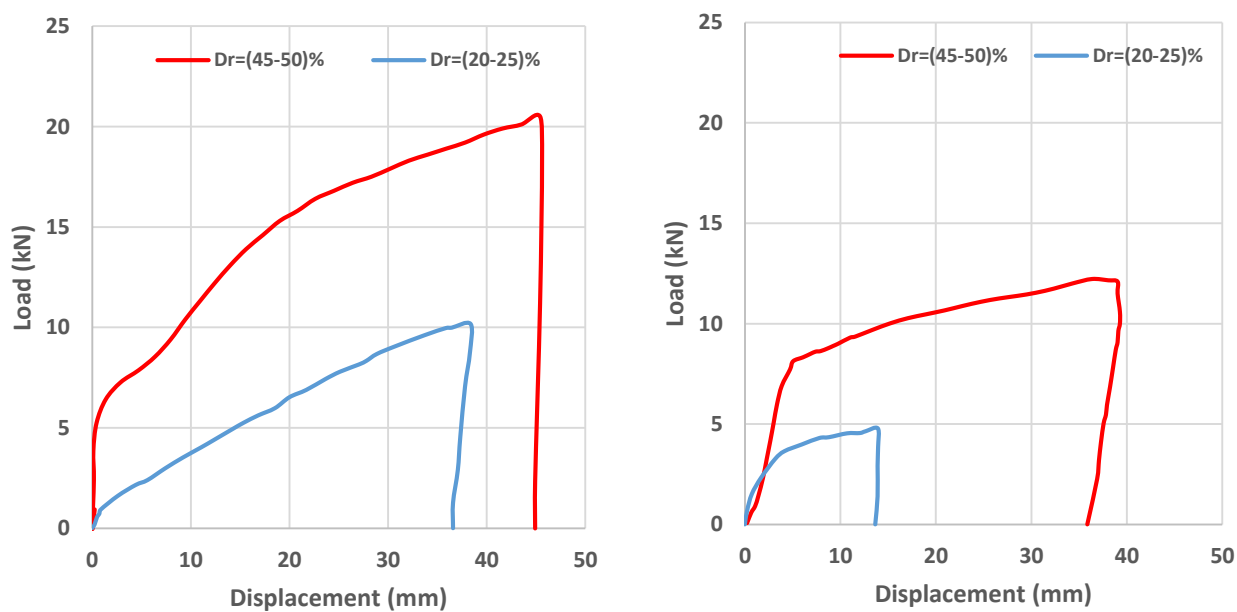
شکل ۸: نمونه‌ای از شمع‌های پیچشی پره‌ای [۱۹]



شکل ۹: قرارگیری شمع‌های پیچشی پره‌ای در دستگاه FCV (با استفاده از تورک موتور)



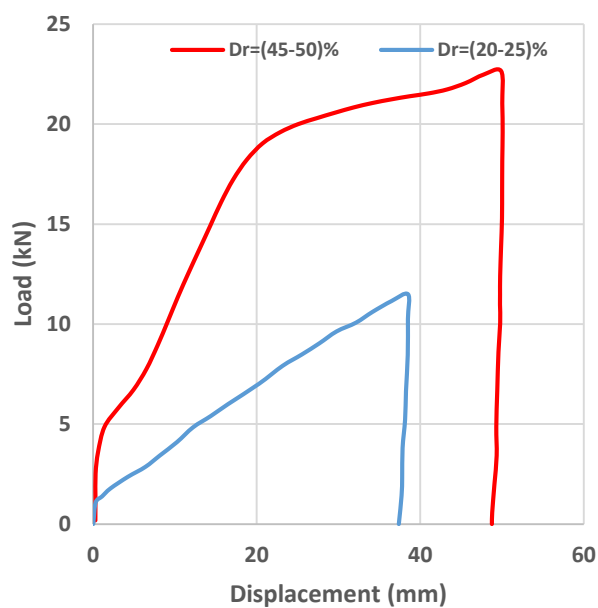
شکل ۱۰: آزمون تکرارپذیری؛ نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای در تراکم نسبی ۴۵ تا ۵۰ درصد (تراکم متوسط)



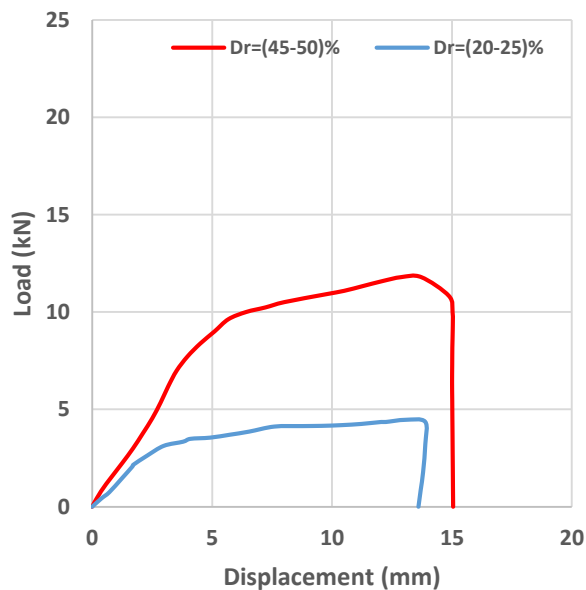
(ب)

(الف)

شکل ۱۱: نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای تک پره با قطر ۷۰ میلی‌متر: (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی

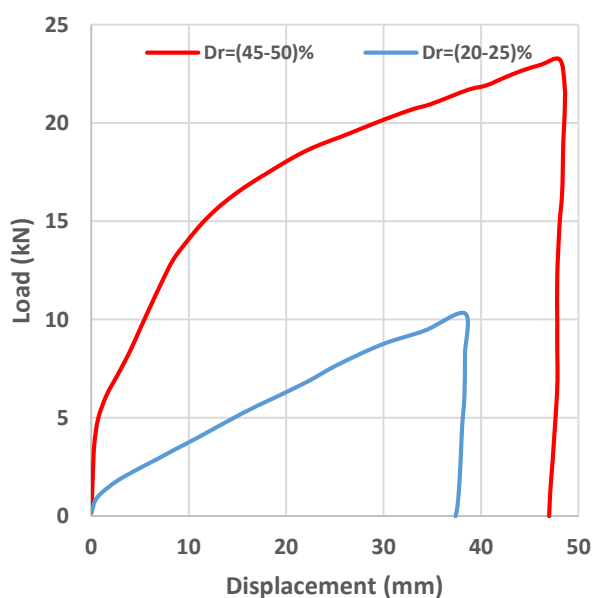


(ب)

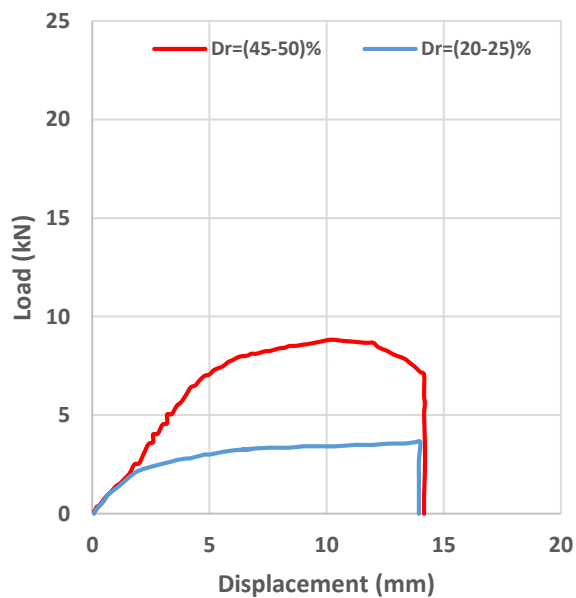


(الف)

شکل ۱۲: نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای دو پره با قطر ۷۰ میلی‌متری و $S/D=3$; (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی

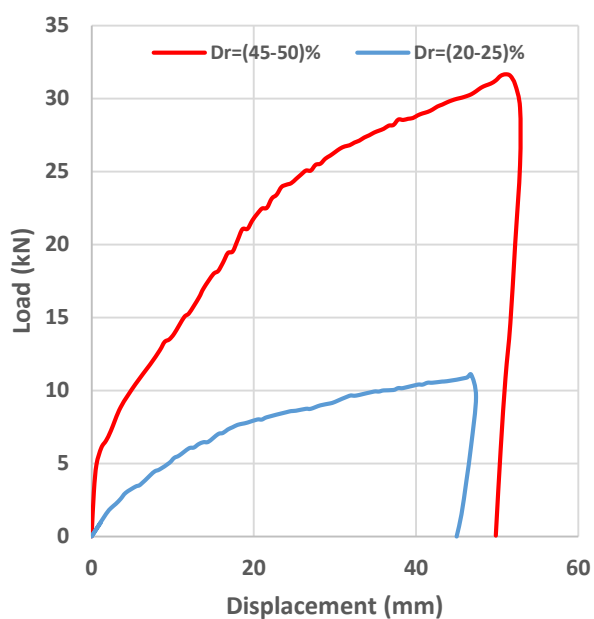


(ب)

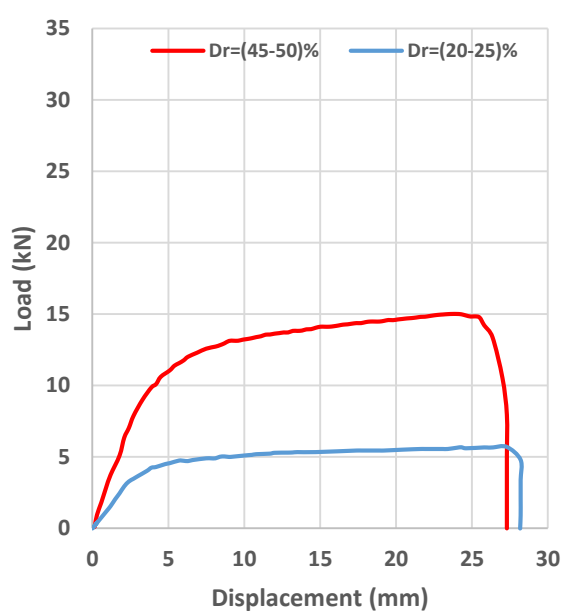


(الف)

شکل ۱۳: نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای سه پره با قطر ۷۰ میلی‌متری و $S/D=1/5$; (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی

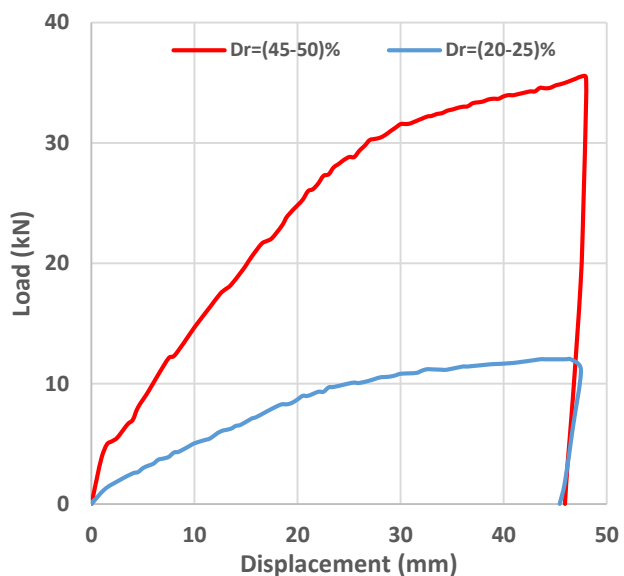


(ب)

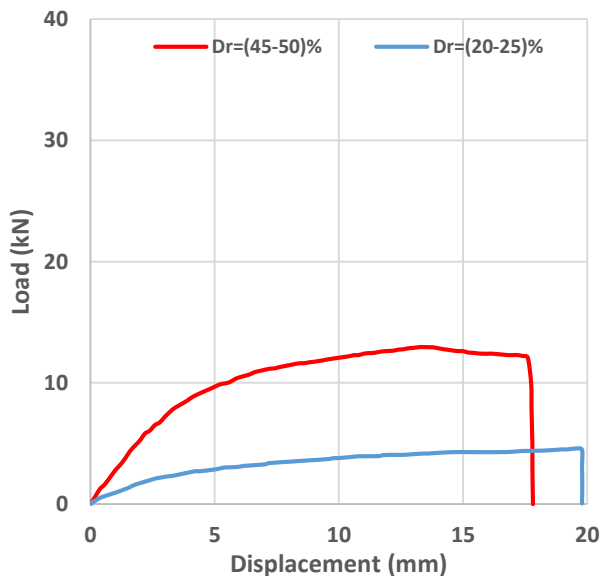


(الف)

شکل ۱۴: نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای دو پره با قطر ۹۰ میلی‌متری و $S/D=1/5$: (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی

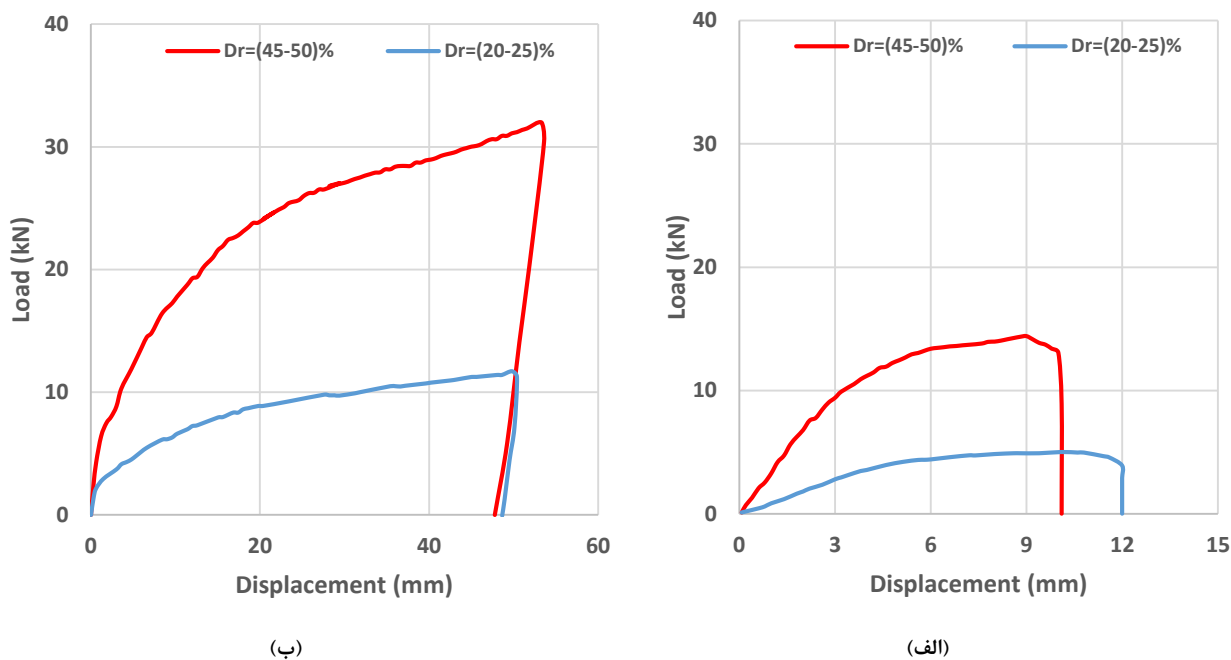


(ب)



(الف)

شکل ۱۵: نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای دو پره با قطر ۹۰ میلی‌متری و $S/D=3$: (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی



شکل ۱۶ - نمودار بار-تغییر مکان شمع پیچشی پره‌ای سه پره با قطر ۹۰ میلی متری و $S/D=1/5$ ؛ (الف) آزمایش فشاری و (ب) آزمایش کششی

فهرست جدول ها

جدول شماره ۱: خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه بندر انزلی [۱۷]

D_{50}	۰/۲۱	γ_{dmax}	۱/۷
C_u	۲/۱	γ_{dmin}	۱/۵
C_c	۱/۱	e_{max}	۰/۸۹
C	۰/۰۸۷	e_{min}	۰/۶۳
Φ	۳۵-۳۰	G_s	۲/۶۹

جدول شماره ۲: مقادیر β و N_i برای طراحی شمع [۱۶]

زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	شمع‌های درجا		شمع‌های کوبیدنی		نوع خاک
	β	N_i	β	N_i	
۲۵-۳۰	۰/۲۵-۰/۳۲	۳-۱۰	۰/۲۵-۰/۳۲	۳-۱۰	رس
۲۸-۳۴	۰/۲-۰/۳	۱۰-۳۰	۰/۳-۰/۵	۲۰-۴۰	لای
۳۲-۴۲	۰/۲-۰/۴	۲۰-۳۰	۰/۳-۰/۸	۳۰-۸۰	ماسه شل
۳۲-۴۲	۰/۳-۰/۵	۳۰-۶۰	۰/۶-۱	۵۰-۱۲۰	ماسه متوسط
۴۲-۴۲	۰/۴-۰/۶	۱۰۰-۵۰	۰/۸-۱/۲	۱۰۰-۱۲۰	ماسه متراکم
۳۵-۴۵	۰/۴-۰/۷	۸۰-۱۵۰	۰/۸-۱/۵	۱۵۰-۳۵۰	شن

جدول شماره ۳: مقایسه ظرفیت باربری آزمایشگاهی با روش CFEM [۱۶]

Q _{u,FCV} /Q _{u,CFEM}	Q _{u,FCV}	CFEM (2006)				عمق مدفون شمع (cm)	قطر میله مرکزی شمع (mm)	S/D	قطر پره (mm)	تراکم خاک	نوع شمع
		Q _{u,CFEM}	Q _{s,helix}	Q _{s,shaft}	Q _t						
(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)						
۱/۰۸	۳/۵	۳/۲۳	-	۰/۸۵	۲/۳۸	۷۵	۳۲	-	۷۰	سست	تک پره
۱/۱۴	۴	۳/۵۲	۰/۷۶	۰/۳۸	۲/۳۸	۷۵	۳۲	۳	۷۰	سست	دو پره
۱/۱۶	۱۰	۸/۶۱	-	۲/۲۶	۶/۳۵	۷۵	۳۲	-	۷۰	متراکم	تک پره
۱/۱۸	۱۱	۹/۳۳	۲/۰۱	۰/۹۷	۶/۳۵	۷۵	۳۲	۳	۷۰	متراکم	دو پره
۱	۷	۷/۰۲	۱/۱۸	۰/۲۹	۵/۵۵	۷۵	۳۲	۳	۹۰	سست	دو پره
۰/۹۳	۶/۵۰	۷/۰۲	۱/۱۸	۰/۲۹	۵/۵۵	۷۵	۳۲	۱/۵	۹۰	سست	سه پره
۰/۹۷	۱۸	۱۸/۵۹	۳/۰۸	۰/۷۲	۱۴/۷۹	۷۵	۳۲	۳	۹۰	متراکم	دو پره
۱/۰۸	۲۰	۱۸/۵۹	۳/۰۸	۰/۷۲	۱۴/۷۹	۷۵	۳۲	۱/۵	۹۰	متراکم	سه پره

جدول شماره ۴: خلاصه دسته‌بندی نتایج آزمایشات

حداکثر ظرفیت کششی (kN)	حداکثر ظرفیت فشاری (kN)		حداکثر ظرفیت فشاری (kN)		عمق مدفون شمع (cm)	قطر میله مرکزی شمع (mm)	S/D	قطر پره (mm)	نوع شمع	
	تراکم متوسط	سست	تراکم متوسط	سست						تراکم متوسط
۱۲	۵	۱۶	۷	۱۰	۳/۵	۷۵	۳۲	-	۷۰	تک پره
۱۱	۳/۵	۱۸/۵	۸	۱۱	۴	۷۵	۳۲	۳	۷۰	دوپره
۸	۲/۵	۱۷	۷	۱۳	۳/۵	۷۵	۳۲	۱/۵	۷۰	سه پره
۱۵	۶	۱۷	۸	۱۳	۵	۷۵	۳۲	-	۹۰	تک پره
۱۴	۵	۲۵	۹	۱۷/۵	۶	۷۵	۳۲	۱/۵	۹۰	دوپره
۱۳/۵	۴/۵	۲۹	۱۱	۱۸	۷	۷۵	۳۲	۳	۹۰	دوپره
۱۳	۴	۲۷	۱۰	۲۰	۶/۵	۷۵	۳۲	۱/۵	۹۰	سه پره

جدول شماره ۵: مقایسه حداکثر ظرفیت باربری فشاری و کششی شمع‌های پیچشی پره‌ای

نحوه بارگذاری	حداکثر ظرفیت کششی (kN)		حداکثر ظرفیت فشاری (kN)		S/D	تعداد پره‌ها
	متوسط	سست	متوسط	سست		
استاتیکی	۱۵	۶	۱۷	۸	-	تک پره
رفت و برگشتی	۴/۵	۱/۵	۱۷	۸	-	تک پره
استاتیکی	۱۳/۵	۴/۵	۲۹	۱۱	۳	دو پره
رفت و برگشتی	۷	۲/۴	۲۹	۱۱	۳	دو پره
استاتیکی	۱۳	۴	۲۷	۱۰	۱/۵	سه پره
رفت و برگشتی	۷	۲	۲۷	۱۰	۱/۵	سه پره