

تأثیر فشار تزریق آب بر عملکرد شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی

سمیه اکبرنژاد^۱، نوید گنجیان^{۱*}، ابوالفضل اسلامی^۲، محمد میثم فدایی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

s.akbarnezhad@iau.ac.ir , n.ganjian@iau.ac.ir , Fadaee@iau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

afeslami@aut.ac.ir

چکیده

نوع رسوب‌گذاری نهشته‌های لسی موجود در برخی نواحی استان گلستان سبب ایجاد ساختار لانه‌زنبوری سست با دانسیته بسیار پایین در این مصالح شده و این ویژگی، عامل بروز چالش‌های ژئوتکنیکی و سازه‌ای بسیاری بوده است. راهکارهای متعددی برای بهسازی این قبیل خاک‌های مسئله‌دار وجود دارد که یکی از این راهکارها، استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی می‌باشد. در این تحقیق، از مدل‌سازی با ابعاد واقعی شمع‌های پیچشی مخروطی جهت بررسی کارایی این شمع‌ها استفاده شده است. در این راستا، هشت شمع پیچشی پره‌ای مخروطی سه پره با طول ۶/۲ متر و نسبت فاصله پره‌ها به قطر ۳، تحت تنش‌های نصب ۲۰۰-۴۰۰-۴۵۰ کیلوپاسکال در دو شرایط اجرای خشک و مرطوب برای بهبود عملکرد خاک لسی واقع در سایت داشلی برون واقع در استان گلستان اجرا شده است. در اجرا به روش خشک، شمع‌ها تحت سه تنش، نصب و بارگذاری گردیده و در اجرا به روش مرطوب ابتدا اقدام به تعیین فشار تزریق بهینه آب نموده و سپس عملکرد شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش تنش نصب، ظرفیت شمع‌های مخروطی در دو حالت خشک و مرطوب افزایش یافته و فشار تزریق پارامتر موثر بر روی رفتار این گونه شمع‌ها می‌باشد که عدم استفاده از فشار تزریق بهینه آب باعث کاهش ۴۵ درصدی ظرفیت باربری شمع می‌شود.

کلمات کلیدی

خاک لسی - شمع پیچشی مخروطی - تنش نصب - فشار تزریق - اجرا به روش تر

لس نوعی خاک است که دوره طولانی رسوب گذاری را تجربه می کند و در شرایط طبیعی نسبتاً پایدار است. مشخصه های ساختاری لانه زنبوری و متخلخل، تغییرات قابل توجه در تراکم پذیری و حساسیت بالا در تماس با آب از ویژگی های مهم این خاک می باشد. تراکم پذیری لس تحت تأثیر عوامل زیادی مانند درصد رطوبت، چگالی خشک، ساختار، الگوی قرارگیری ذرات و میزان تنش وارده است [۱، ۲]. مناطق گسترده ای از شمال شرق ایران خاک های رمبنده ی لسی را در بر گرفته و سبب ایجاد خسارت های گسترده ای به تأسیسات زیربنایی و ابنیه فنی به خصوص پس از مرطوب شدن و اعمال بار بوده اند [۳]. روش های بهسازی این خاک ها به پنج دسته عملیات خاکی، متراکم سازی، فیزیکی - شیمیایی، هیدرولیکی و مسلح سازی تقسیم می شوند. انتخاب روش بهسازی به نیازهای یک پروژه و ویژگی های ژئوتکنیکی زمین بستگی دارد [۴]. یکی از روش های بهسازی خاک های مسئله دار، مسلح نمودن خاک با استفاده از پی های گسترده شمعی^۱ و یا شمع های سنتی می باشد که خیام و همکاران (۲۰۲۱) ظرفیت باربری پی های گسترده شمعی را تحت تأثیر اندرکنش پیچیده بین خاک زیر سازه و المان های گسترده شمعی مورد تحلیل و بررسی نیز قرار دارند [۵]. در سال های اخیر استفاده از نوع جدیدی از شمع ها به نام شمع پیچشی به دلیل ویژگی های منحصر به فردی که داراست رو به افزایش است. شمع های مارپیچ متشکل از شافت مرکزی و دارای یک یا چند پره بوده که با چرخش و فشار، نصب می شوند و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند [۶].

عوامل مختلفی بر ویژگی های عملکرد کششی و فشاری شمع های مارپیچ مانند نوع خاک، شکل پره، تعداد پره، قطر و فاصله بین پره ها، گام مارپیچ، قطر و نوع شافت، زاویه نصب تأثیر می گذارند [۷، ۸]. عرب عامری و اسلامی (۲۰۲۱)، به بررسی دو هندسه مختلف شمع های مارپیچی یکنواخت (شمع های تک مارپیچ و دو مارپیچ با نسبت فاصله به قطر ۱/۵ و ۳) با استفاده از دو روش نصب خشک و مرطوب پرداختند که نتایج نشان داد شمع های دو مارپیچ با نسبت فاصله به قطر ۳ عملکرد بهتری از نظر ظرفیت باربری و بهبود ویژگی های ژئوتکنیکی خاک دارند. و همچنین در روش نصب مرطوب با اعمال بار فشاری و تزریق آب، منجر به بهبود تراکم و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک لسی نسبت به روش نصب خشک می شود [۹]. همچنین عرب عامری و اسلامی (۲۰۲۱) در پژوهشی دیگر به بررسی حدود ۱۳ شمع مارپیچ یکنواخت به طول ۳ متر، قطر پره ۲۵۰ میلی متر و فاصله پره های ۷۵۰ میلی متر با دو روش مختلف نصب خشک و مرطوب بر روی خاک های لسی پرداختند و آزمایش بارگذاری استاتیکی برای همه شمع های مارپیچ انجام دادند. نتایج نشان داد که آزمایش های بارگذاری شمع به شدت به میزان رطوبت در زمان آزمایش، به نیروی فشرده گی و فشار تزریق آب بستگی دارد. در نهایت، شمع های نصب شده مرطوب، ساختار پایداری نسبت به شمع های خشک شده داشته اند [۱۰]. در بهینه سازی فاصله مارپیچ ها کانگ شائو و همکاران^۲ (۲۰۲۲) دریافتند که پارامتر بسیار مهمی، برای به حداکثر رساندن بار محوری نهایی شمع های مارپیچ است. علاوه بر این، چگالی نسبی و تعداد مارپیچ ها به طور قابل توجهی بر عملکرد شمع در کشش و فشار تأثیر می گذارند [۱۱].

انواع مختلف شمع های مارپیچ به طور گسترده مورد مطالعه میدانی و آزمایشگاهی قرار گرفته اند تا عملکرد آن ها از دیدگاه ظرفیت باربری و اندرکنش آنها با خاک بررسی شود. در مطالعه ی حسین پور و همکاران (۲۰۲۴) نتایج مدل سازی فیزیکی شمع مارپیچ مقیاس شده 1g در ماسه خشک با چگالی نسبی ۴۰٪ و ۹۰٪ ارائه شد. نتایج نشان داد که بار نهایی فشاری شمع های تک و دو مارپیچ برای هر دو شرایط چگالی ماسه به طور قابل توجهی بالاتر از بار نهایی کششی آنها است. خاک بالای مارپیچ ها که بار کششی را تحمل می کند، در طول نصب شمع دچار دست خوردگی می شود و پیش بینی بار نهایی کششی در مقایسه با ظرفیت فشاری را دشوارتر می کند. دست خوردگی خاک بالای مارپیچ ها در طول نصب، باعث تفاوت در ظرفیت های کششی و فشاری می شود [۱۲].

با مقایسه شمع مارپیچ با انواع شمع های سنتی پارامترهایی از قبیل هندسه شمع، عمق جای گذاری، قطر شفت و... مورد بررسی قرار گرفت. رحیمی و اسلامی (۲۰۲۴) رفتار بار-جابجایی شمع های مارپیچ و منبسط شده را در سیستم های ژئوتکنیکی بررسی کردند و پارامترهایی

¹ Piled raft foundation

² Kang Shao

مانند عمق جایگذاری، هندسه شمع و جهت بارگذاری محوری را ارزیابی کردند. آنها با استفاده از یک پایگاه داده از ۸۰ آزمایش بارگذاری محوری و تحلیل روابط هایپربولیک، بار-جابجایی، بار نهایی و سختی اولیه شمع‌ها را بر اساس معیارهای مختلف محاسبه کردند. نتایج نشان داد که عواملی مانند نسبت قطر ماریچ یا منبسط‌شده به قطر شفت، سطح مقطع شفت و نوک شمع و جهت بارگذاری بیشترین تأثیر را بر رفتار بار-جابجایی شمع‌ها دارند. همبستگی‌های به‌دست‌آمده از پایگاه داده با اندازه‌گیری‌های هشت شمع ماریچ و منبسط‌شده در مقیاس واقعی را به‌خوبی مطابقت می‌دهد [۱۳]. علاوه بر این، اسماعیل‌زاده و اسلامی (۲۰۲۴) رفتار بار-جابجایی انواع مختلف شمع (شمع مرسوم، ماریچی و منبسط شونده) را تحت فشار و کشش با استفاده از آزمایش‌های مدل سازی شده در مقیاس کوچک در دانشگاه صنعتی امیرکبیر^۱ و آزمایش‌های میدانی در مقیاس واقعی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شمع‌های ماریچ و منبسط شونده نصب شده به روش جکینگ به دلیل حداقل دست‌خوردگی خاک، بالاترین مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. همچنین، شمع‌های ماریچ و منبسط‌شده عملکرد کششی بهتری نسبت به شمع‌های معمولی نشان دادند [۱۴].

تحقیقات محدودی بر روی شمع‌های ماریچ در مقیاس واقعی انجام شده است که بتواند به طور کمی اثرات چرخش و حرکت ماریچ‌ها را در حین نصب بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک بررسی نماید [۱۰]. اهمیت شرایط اجرا، تعداد ماریچ، فاصله پره، فشار آب و تنش نصب برای به حداکثر رساندن عملکرد شمع‌های ماریچ بسیار مهم است و در صورت استفاده صحیح، این شمع‌ها ساختار خاک را بهبود می‌بخشند و یک راه‌حل قوی برای پی‌ها در خاک‌های رملی می‌باشند. به دلیل نقاط ضعف عمده هریک از روش‌های بهسازی به‌تنهایی، در تحقیق حاضر از ترکیب روش‌های بهسازی (هیدرولیکی، تراکم و مسلح‌سازی) به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است. به همین منظور با انجام عملیات حفاری توأم با فشار استاتیکی به روش نصب خشک و مرطوب و استفاده از شمع‌های پیچشی پره‌ای به عنوان المان مسلح به بهسازی خاک‌های لسی استان گلستان اقدام گردید. رفتار شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی سه پره با طول ۶/۲ متر با نسبت فاصله به قطر ۳، در دو شرایط اجرای خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا شمع‌ها در حالت خشک با سه تنش نصب مختلف اجرا و ظرفیت باربری آنها تعیین گردید. همچنین شمع‌هایی نیز به روش مرطوب تحت فشار تزریق ۲، ۴ و ۶ بار اجرا و سپس فشار تزریق بهینه به‌دست‌آمده و در نهایت، شمع‌ها در شرایط مرطوب، تحت فشار تزریق بهینه ۴ بار اجرا و رفتار آنها بررسی شده است.

۲- موقعیت سایت

لس در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در مناطق آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک وجود داشته [۱۵] و با توجه به ویژگی‌های ساختاری و ترکیب آن، اغلب قابلیت رմبندگی دارند [۱۶]. در سیل سال ۱۳۹۷ خسارت عمده‌ای به ساختمان‌ها و ابنیه فنی راه‌آهن و سیل‌های ذخیره مواد در منطقه شمال استان گلستان که تحت پوشش خاک‌های لسی می‌باشد، وارد شد. به همین دلیل منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، ناحیه روستای داشلی برون در ۱۵۰ کیلومتری مرکز استان گلستان در کشور ایران و نزدیک با مرز کشور ترکمنستان انتخاب شد. موقعیت مکانی محل مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. ترکیبات شیمیایی لس عمدتاً سیلیس، آلومینا و اکسید کلسیم است. ترکیب شیمیایی لس محدوده مورد مطالعه، در جدول ۱ خلاصه شده است [۲].

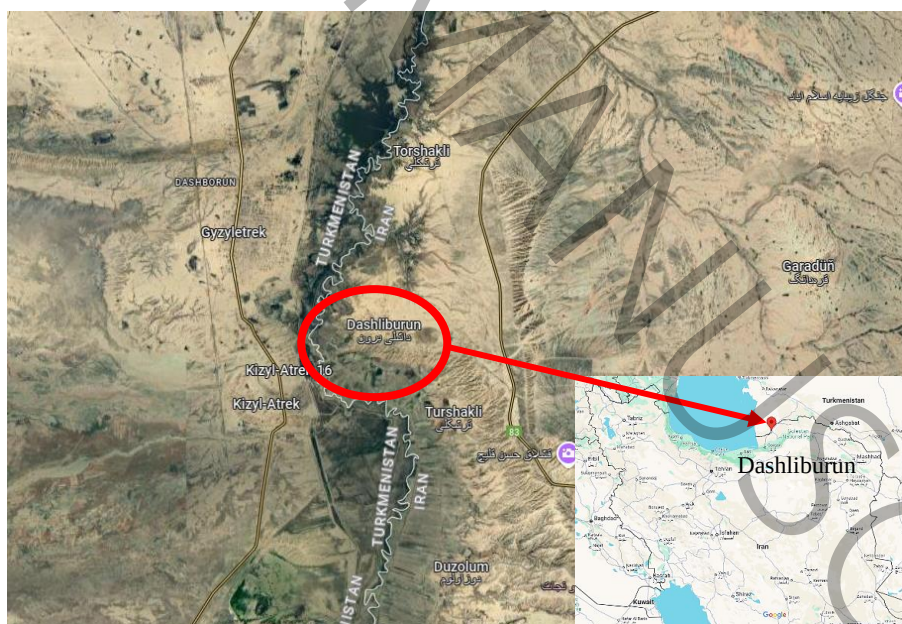
^۱ Frustum confining vessel at Amirkabir University of Technology

جدول ۱: ترکیب شیمیایی لس مورد مطالعه (تحلیل^۱ XRF)

Table 1: Chemical composition of loess (XRF Analysis)

ترکیبات	مقادیر (%)
سیلیکا (SiO_2)	۵۴/۲۲
آلومینا (Al_2O_3)	۹/۷۷
اکسید سدیم (Na_2O)	۲/۰
منیزیم (MgO)	۴/۰۵
اکسید پتاسیم (K_2O)	۲/۵۰
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۴/۲۲
اکسید کلسیم (CaO)	۱۳/۷۸
افت حرارتی	۹/۴۶

میزان بارندگی متوسط سالانه این منطقه حدود ۲۱۴ میلیمتر است. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی و بر اساس روش آمبرژه^۲ منطقه مورد مطالعه جزو اقلیم نیمه‌بیابانی خشک و سرد محسوب می‌شود [۱۷]. تصاویر محل مورد مطالعه در منطقه داشلی برون خسارات وارده به ابنیه فنی در شمال شرق ایران در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت مکانی محل مورد مطالعه در نقشه

Fig. 1: Location of the study site on the map

¹ X-ray fluorescence

² Amberger



شکل ۲: تصاویر محل مورد مطالعه در منطقه داشلی برون (الف) خسارت وارده در کنار محور (ب) وقوع ناپایداری

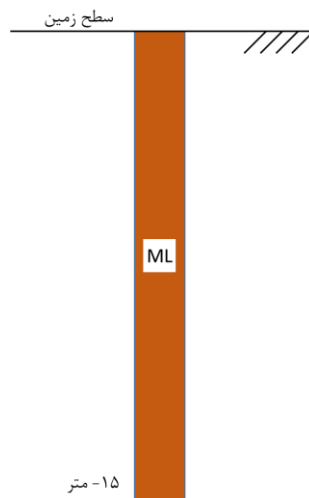
Fig. 2: Images of the research site in the Dashli Borun area: a) Road collapse, b) Instability occurrence

به منظور شناسایی دقیق خاک محل، دو گمانه ماشینی با اعماق ۱۵ و یک گمانه به عمق ۳۰ متر به روش مغزه گیری ممتد در نزدیکی ابنیه و راه دسترسی روستا در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه، مطابق شکل ۳ حفاری شد و همچنین به دلیل نیاز به نمونه های بیشتر اقدام به برداشتن نمونه بلوکی (تهیه نمونه دست نخورده) از سطح ترانشه گردید و در ادامه پروفیل خاک از سطح زمین در شکل ۴ نشان داده شد.



شکل ۳: (الف) عملیات حفاری گمانه ها در منطقه داشلی برون، (ب) برداشت نمونه بلوکی

Fig. 3: a) Drilling operations at the Dashli Borun site, b) Collection of block samples



شکل ۴: پروفیل خاک از سطح زمین

Fig. 4: Soil profile from the ground surface

نمونه برداری به دو صورت دست خورده و دست نخورده انجام شده است. برای انجام آزمایش‌ها و تعیین مشخصات و پارامترهای مقاومت طبیعی خاک در آزمایشگاه از نمونه دست نخورده و برای آزمایش‌های فیزیکی از نمونه دست خورده استفاده شده است. منحنی دانه بندی خاک پایه در شکل ۵ و مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. خواص فیزیکی پایه لس مطابق با استاندارد ASTM D4318 [۱۸]، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تعیین شد و کلیه آزمایشات ارائه شده در جدول ۳ مطابق استاندارد ASTM انجام گردید. بر اساس سیستم طبقه بندی یکپارچه (USCS)^۱، خاک مورد مطالعه سیلت (ML) با حد روانی کم و حداقل چگالی خشک $1/29 \text{ gr/cm}^3$ بوده و با توجه به انجام آزمایش شاخص رمبندگی (I_e)^۲ مطابق استاندارد ASTM D5333-03، درجه رمبندگی آن طبق جدول ارائه شده در استاندارد در محدوده شدید قرار دارد.

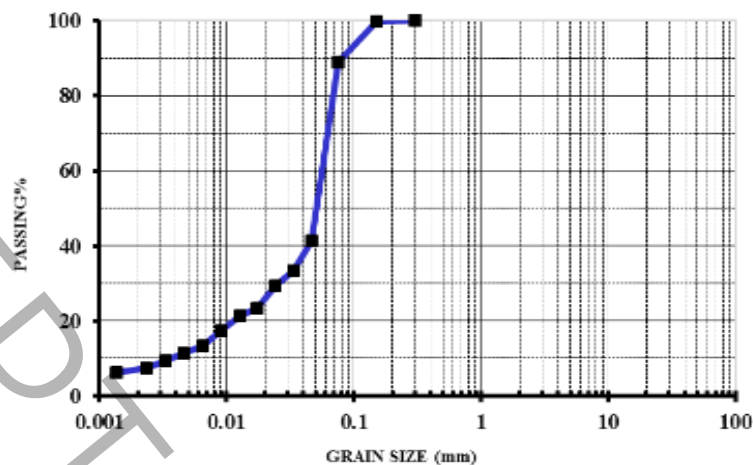
جدول ۲: مشخصات مرتبط با دانه بندی خاک مورد بررسی

Table 2: specification of Soil Gradation

عمق نمونه (متر)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	ضریب انحنای (C _C)	ضریب یکنواختی (C _U)
۶	۰/۰۰۴	۰/۰۲۵	۰/۰۵۶	۳/۱۴	۱۵/۳۵

¹ Unified Soil Classification System

² Collapse index



شکل ۵: منحنی دانه بندی خاک لسی مورد بررسی در تحقیق حاضر

Fig. 5: Grain size distribution curve

جدول ۳: خواص خاک لس گلستان (منطقه داشلی برون)

Table 3: Physical properties of loess soil in Golestan Province (Dashli Borun Area)

مقدار	خصوصیات	مقدار	خصوصیات
۲۱	زاویه اصطکاک خاک (ϕ°)	ML	نوع خاک
۱۰	زاویه اصطکاک اشباع (ϕ'°)	۱۷	چسبندگی طبیعی خاک C (kPa)
۲۷	حد روانی LL (%)	۴	چسبندگی اشباع خاک C' (kPa)
۴	شاخص خمیری PI (%)	۵	رطوبت طبیعی خاک (%)
۲۳	حد خمیری PL (%)	۲/۶۸	چگالی مخصوص
۲۰	شاخص رمبندگی (I_e) (%)	۱/۱۱	نسبت تخلخل اولیه
۱۱ الی ۱۵	محدوده اعداد نفوذ استاندارد (N_{SPT})	۱/۲۹	دانسیته (gr/cm^3)

۳- اجرای شمع‌های پیچشی

جهت بررسی عملکرد شمع پیچشی در مقیاس واقعی^۱ ۸ شمع بزرگ مقیاس پیچشی در محل بر روی خاک های لسی طبق جدول ۴ نصب و اجرا شده است. هندسه و ابعاد شمع های پیچشی طبق جدول ۵ بوده است.

¹ Full scale

جدول ۴: برنامه مدل های مقیاس واقعی اجرا شده

Table 4: Helical pile installation program

شرایط اجرا	فشار تزریق آب (bar)	تنش نصب (kPa)
خشک	-	۲۰۰-۴۰۰-۴۵۰
مرطوب	۴	۲۰۰-۴۰۰
	۲-۴-۶	۴۵۰

جدول ۵: هندسه و مشخصات شمع های مخروطی بزرگ مقیاس

Table 5: Geometry and specifications of large-scale conical helical piles

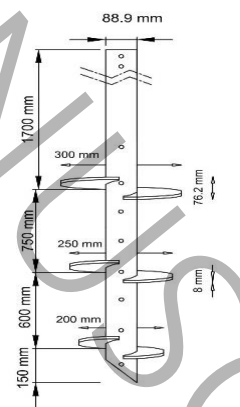
نام شمع	تعداد پره	طول شمع (cm)	عمق نفوذ (cm)	قطر پره (cm)	طول گام پره (cm)	ضخامت پره (cm)	قطر شفت (cm)	ضخامت شفت (cm)	نسبت فاصله پره ها	فاصله نوک شمع تا پره انتهایی (cm)
CH(D or W) 6.3.3	۳	۶۲۰	۶۰۰	۲۰-۲۵-۳۵	۷/۶۲	۰/۸	۸/۸۹	۰/۵	۳	۱۵

بر اساس جدول ۵ نحوه نام گذاری شمع ها به این صورت است که دو حرف لاتین ابتدای نام گذاری، مخفف Conical Helix، حرف بعدی شرایط انجام آزمایش (خشک یا مرطوب) و سه عدد بعدی به ترتیب بیانگر ارتفاع شمع، تعداد پره و نسبت فاصله پره به قطر است. شمع پیچشی مخروطی سه پره با نسبت فاصله میان پره ای به قطر پره سه (S/D=3) برای عمق شش متری ساخته شده است. برای نصب در عمق ۶ متری از یک شافت به طول ۳ متر به عنوان اکستنشن استفاده گردیده و شمع تحت بار فشاری قرار گرفته است. طرح شماتیک و شمع های اجرایی پیچشی مخروطی در شکل ۶ مشاهده می شود.



(ب)

شکل ۶: الف) طرح شماتیک شمع پیچشی مخروطی ب) تصویر شمع های اجرایی



(الف)

Fig. 6: a) Schematic design, b) constructed conical helical pile

شمع پیچشی از طریق اعمال گشتاور و نیروی فشاری که توسط یک ماشین هیدرولیک (ماشین حفار) تأمین گردیده، در درون زمین فرو رانده می شود. شمع پیچشی باید به گونه ای نصب گردد که کمترین کج شدگی را نسبت به راستای قائم داشته باشد. پس از اطمینان از قائم

بودن شمع، نیروی گشتاور به شمع‌های پیچشی اعمال و با نیروی فشاری به درون زمین رانده می‌شود. تصاویری از دستگاه حفاری به همراه شمع‌های پیچشی برای دو روش مرطوب و خشک مطابق شکل ۷ نشان داده شده است. بررسی اثر نیروی فشاری اعمال شده بر انتهای شمع و یا همان تنش نصب و فشار آب به‌عنوان دو عامل مهمی می‌باشند که باعث تغییر مشخصات ژئوتکنیکی خاک و کاهش پتانسیل رمبندگی می‌شوند.



شکل ۷: جزئیات تجهیزات اجرایی (الف) اجرای نصب مرطوب (ب) اجرای نصب خشک

Fig. 7: Details of the equipment a) wet installation, b) dry installation

۴- عملکرد شمع حین نصب

برای کنترل تنش وارده بر خاک توسط پره‌ها از وزن ماشین حفاری به‌عنوان تنش نصب به شمع استفاده شده است. در دستگاه حفاری از دو جک ۸ تن فشاری به صورت سری برای پایین بردن شمع پیچشی و اعمال نیرو بر شمع‌ها در حین چرخش استفاده شده است. با توجه به اینکه جک‌ها هیدرولیک بوده، بنابراین با نصب گیج فشار در مسیر شیر کنترل جک‌ها فشار وارده به شمع در هر لحظه از زمان ثبت شد. برای تبدیل فشار به نیرو برای استفاده از آن در تحلیل‌ها، با قرار دادن یک نیروسنج در زیر راد هدایت‌کننده مقدار اعداد به دست آمده از گیج فشار به نیرو تبدیل شد (شکل ۸). روش اجرا به این صورت می‌باشد که با اعمال فشار توسط جک‌های دستگاه حفاری فشار روغن در گیج قرائت شده و همزمان با آن نیروی ایجاد شده در نیروسنج قرائت می‌گردد. در پایان در هر فشار قرائت شده توسط گیج فشار روغن با نیروی معادل آن توسط نیروسنج بدست می‌آید. در روش مرطوب برای تزریق آب، از یک پمپ و مخزن کنترل فشار به همراه دی‌سنج استفاده گردید. در ابتدا مخزن آب به پمپ متصل شد. سپس پمپ آب توسط شلنگ‌های فشار قوی به یک مخزن فشارشکن جهت کنترل نوسان و اثر ضربه در حین پمپاژ آب وصل شد. همچنین از مخزن فشارشکن یک شلنگ به پشت لوله هدایت‌کننده شمع متصل شده و از شلنگ دیگر به عنوان شیر اطمینان استفاده شده تا در صورت مسدود شدن مسیر آب توسط گل و یا کم بودن دی‌سنج آب پمپ خراب نشود.



شکل ۸: استفاده از نیروسنج برای تبدیل فشار به نیرو.

Fig. 8: Conversion of Pressure to Force Utilizing a Load Cell

شمع‌های پیچشی در عمق ۶ متر نصب شدند و تست بارگذاری روی هر شمع انجام و سپس جابه‌جایی در بالای شمع اندازه‌گیری شده است. آزمایش بارگذاری استاتیکی محوری فشاری مطابق استاندارد ASTM D1143/D1143M-07(2013) صورت گرفته است [۱۹]. ظرفیت باربری هر شمع در نشست ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره مورد بررسی قرار گرفته است. در مرکز بالای شمع یک صفحه بارگذاری، لودسل و جک هیدرولیکی نصب و کیسه‌های ماسه و بلوک‌های بتنی روی فریم برای تأمین وزن مورد نیاز قرار داده شد. همچنین این وزن بیشتر از ۱/۲ برابر حداکثر بار تأمین شده تا اطمینان از پایداری تیر بدهد و قرائت بار و جابه‌جایی توسط دیتالاگر اندازه‌گیری شده است. جابه‌جایی رأس شمع توسط سه گیج جابه‌جایی در بازه‌های زمانی منظم ثبت گردیده و میانگین مقادیر قرائت شده به‌عنوان جابه‌جایی رأس شمع لحاظ شده است. شکل ۹ نمایی از سیستم بارگذاری بر شمع را نشان می‌دهد.



شکل ۹: انجام بارگذاری استاتیکی شمع پیچشی فشاری

Fig. 9: Static axial load testing for compression test

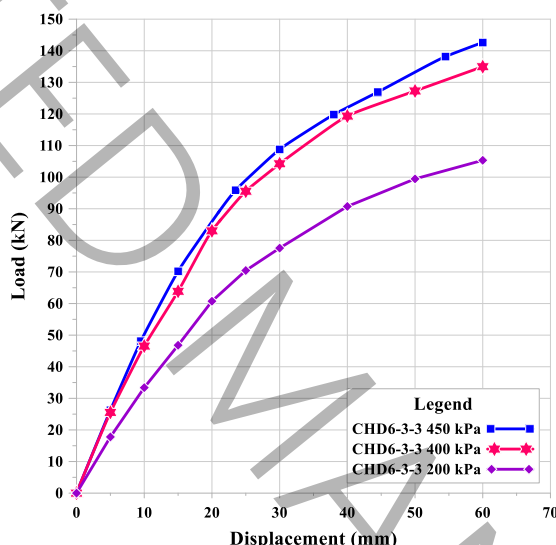
۵- بحث و مقایسه

محققان در مراجع مختلف [۲۰-۲۲] ظرفیت فشاری محوری شمع‌ها را تحت جابجایی معادل ۱۰ درصد قطر شمع تعریف کرده‌اند. این تعریف تضمین می‌کند که جابجایی کافی برای بسیج کردن ظرفیت انتهایی شمع وجود دارد. به طور مشابه، برای شمع‌های مخروطی ظرفیت

فشاری محوری شمع‌های مارپیچ را می‌توان معادل جابجایی ۱۰٪ قطر متوسط پره تعریف کرد. در این راستا نمودار بار- جابه‌جایی در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در دو حالت خشک و مرطوب مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه نتایج حاصل به ترتیب ارائه می‌شود.

۵-۱ اثر تنش در روش نصب خشک

شکل ۱۰ حاوی نمودارهای بار- جابجایی مربوط به شمع پیچشی مخروطی با قطر پره‌های ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر، فاصله بین پره‌ای ۶۰۰ و ۷۵۰ میلی‌متر و عمق نصب ۶ متر برای روش نصب خشک در میدان، تحت تنش‌های نصب مختلف می‌باشد. همچنین جدول ۶ مربوط به ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی در تغییر شکل معادل با ۵، ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در روش نصب خشک می‌باشد. در روش نصب خشک در تنش نصب متوسط ۴۵۰ کیلوپاسکال در زیر پره‌ها، بیشترین و در تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال کمترین ظرفیت باربری حاصل شده‌است. دست‌خوردگی کمتر و تمرکز تنش در این شمع سبب شده تغییر زیادی در ظرفیت باربری شمع بر اساس تغییر تنش نصب ایجاد شود.



شکل ۱۰: نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب خشک

Fig. 10: Load-displacement of the conical helical pile under varying installation stresses in the dry installation condition

جدول ۶: ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی سه پره تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب خشک.

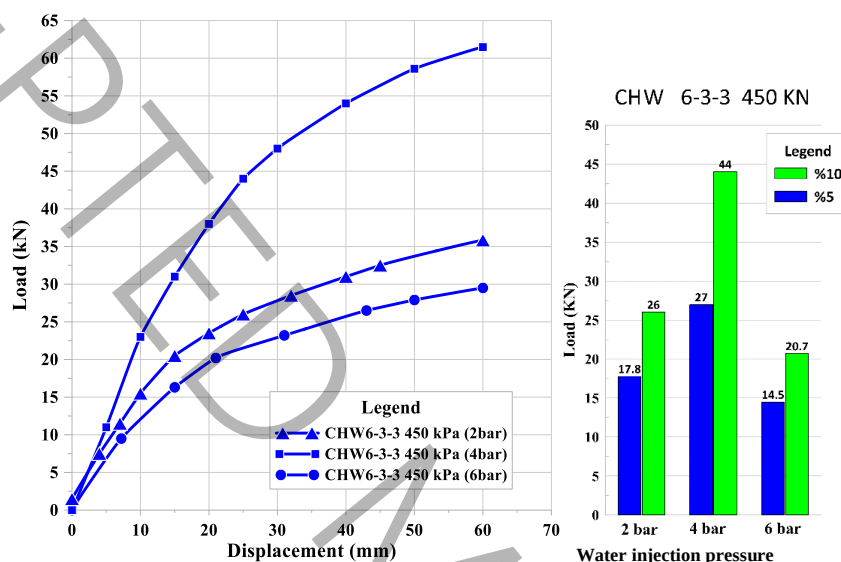
Table 6: The bearing load of the three-helix conical helical pile under various installation stresses in the dry installation condition

ظرفیت باربری فشاری (kN)		تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابه‌جایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره	جابه‌جایی متناظر ۵ درصد قطر پره		
۷۰/۵	۴۱	۲۰۰	CHD 6.3.3
۹۸/۵	۵۷/۲	۴۰۰	CHD 6.3.3
۹۸/۸	۶۰/۹	۴۵۰	CHD 6.3.3

۵-۲ اثر فشار تزریق آب در روش مرطوب

۵-۲-۱ تعیین فشار تزریق بهینه

نمودار شکل ۱۱ و جدول ۷ به ترتیب شامل منحنی های بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل معادل با ۵، ۱۰ درصد میانگین قطر پره ها مربوط به شمع پیچشی مخروطی برای فشارهای آب ۲ و ۴ و ۶ بار و در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال می باشد. علت بررسی تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال به دلیل ماکسیمم بودن ظرفیت باربری در حالت خشک بوده است. نتایج نشان می دهد ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی، با تغییر فشار تزریق آب به شدت تغییر می کند. در فشار آب ۶ بار نسبت به فشار آب ۴ بار ظرفیت باربری شمع در تغییر مکان قائم ۲۵ میلی متر به مقدار ۵۳ درصد کاهش یافته و در فشار آب ۲ بار نسبت به فشار آب ۴ بار معادل ۴۱ درصد کاهش را نشان می دهد.



شکل ۱۱: نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت فشار تزریق های متفاوت.

Fig. 11: Load-displacement records of the conical helical pile under different injection pressures

جدول ۷: ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی سه پره تحت فشار تزریق های متفاوت در حالت نصب مرطوب

Table 7: Ultimate load of the three-helix conical helical pile under different injection pressures in the wet installation condition

ظرفیت باربری فشاری (kN)		فشار آب (bar)	تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابجایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره	جابجایی متناظر ۵ درصد قطر پره			
۲۶	۱۷/۸	۲	۴۵۰	CHW 6.3.3
۴۴	۲۷	۴	۴۵۰	CHW 6.3.3
۲۰/۷	۱۴/۵	۶	۴۵۰	CHW 6.3.3

عرب عامری و اسلامی در سال ۲۰۲۱ بر روی خاک لسی با شمع های پیچشی یکنواخت سه پره به بررسی اثر فشار تزریق آب بهینه پرداختند که مهم ترین پارامتر موثر بر ظرفیت باربری در هنگام نصب شمع می باشد. بر اساس نتایج تحقیق انجام شده، فشار آب کم باعث عدم تخریب ساختار خاک لس و تراکم کمتر خاک اطراف شمع می شود و فشار آب زیاد باعث آب شستگی و خالی شدن خاک اطراف پره ها شده است [۱۰]. در این تحقیق نیز با توجه به متفاوت بودن هندسه شمع پیچشی نتایج مشابهی مشاهده گردید و در دو حالت فشار تزریق کم و زیاد، سبب کاهش ظرفیت باربری در حدود ۴۵ درصد در مقایسه با تزریق بهینه گردید.

۵-۲-۲ بررسی کیفی اثر فشار تزریق آب بهینه در هنگام اجرا

کاهش ظرفیت باربری در فشار آب ۶ بار به دلیل جابه‌جایی زیاد و شسته شدن ذرات خاک لس و شسته شدن آن از کنار لوله مرکزی شمع یا حرکت آنها به درون خاک لس مطابق شکل (۱۲ الف) می‌باشد. جابه‌جایی زیاد ذرات خاک لس در اثر جریان و فشار آب، سبب تغییر در تعداد و حجم حفرات و همچنین ساختار قرارگیری آنها شده و این تغییرات سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود. همچنین در صورت کم بودن فشار آب، خاک لس اشباع نشده و یا به دلیل فشار کم آب، گل درون شفت مرکزی شمع پیچشی مطابق شکل (۱۲ ب) پر می‌شود. بیشترین ظرفیت باربری شمع پیچشی مخروطی در فشار آب ۴ بار و تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال بدست آمده است. در فشار آب بهینه، خاک در محدوده پره‌های شمع پیچشی مطابق شکل (۱۲ ج) نشست کرده و سبب افزایش تراکم و متعاقباً افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. تعیین فشار آب بهینه نقش بسیار مهمی در اجرای صحیح شمع‌های پیچشی به روش نصب مرطوب و بالا بردن ظرفیت باربری شمع‌ها دارد. با افزایش تغییر مکان قائم شمع در هنگام بارگذاری به اختلاف ظرفیت باربری شمع‌ها تحت فشارهای متفاوت آب تزریق شده افزوده می‌شود. در فشار آب ۴ بار بیشترین ظرفیت باربری برای شمع پیچشی پره ای سه پره مخروطی اتفاق می‌افتد.

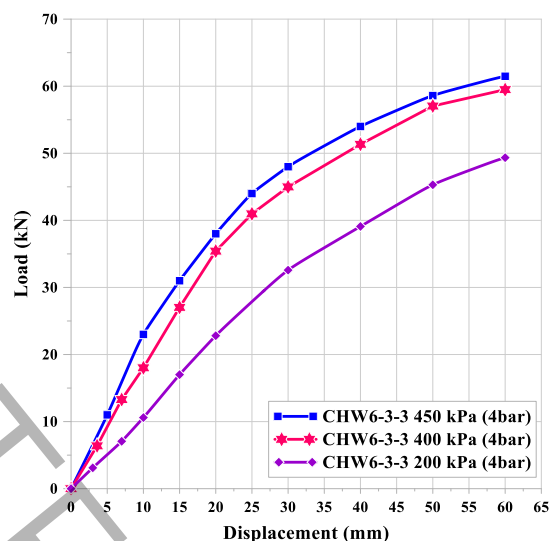


شکل ۱۲: بررسی کیفی اثر فشار آب در اجرا الف) خالی شدن اطراف شفت به دلیل فشار آب زیاد ب) پر شدن شفت مرکزی توسط گل ج) نشست خاک مناسب خاک در فشار آب ۴ بار

Fig. 12: Examining different water pressures during wet installation of helical piles (a) Space around the shaft due to high water pressure (b) Filled central shaft by mud (c) Proper soil settlement at the water pressure of 4 bars.

۵-۲-۳ اثر تنش نصب مرطوب

پس از تعیین فشار بهینه، اثر فشار نصب تحت تنش‌های مختلف در حالت مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۳ و جدول ۹ به ترتیب نمودار بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل‌های معادل و عمق نصب ۶ متر برای روش نصب مرطوب تحت فشار تزریق آب ۴ بار برای تنش‌های نصب مختلف می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش نصب غالباً سبب افزایش ظرفیت باربری شده‌است. در روش نصب مرطوب، در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال بیشترین و در تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال کمترین ظرفیت باربری حاصل شده‌است.



شکل ۱۳: نمودار بارگذاری شمع پیچشی مخروطی تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب مرطوب در فشار تزریق بهینه ۴ بار.

Fig. 13: Loading curve of the conical helical pile under various installation stresses in the wet installation condition (water pressure of 4 bar)

جدول ۸: ظرفیت باربری شمع پیچشی پره ای سه پره تحت تنش‌های نصب مختلف در حالت نصب مرطوب در فشار تزریق بهینه ۴ بار

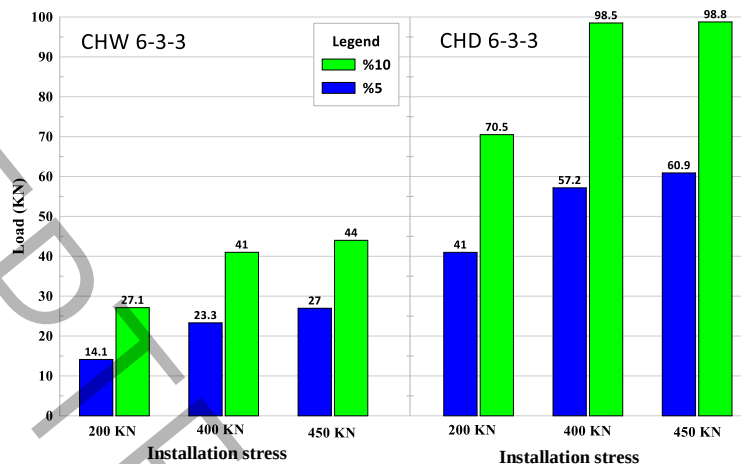
Table 8: Ultimate load of the three-helix conical helical pile under various installation stresses in the wet installation condition (water pressure of 4 bar)

ظرفیت باربری فشاری (kN)		فشار آب (bar)	تنش نصب (kPa)	نوع شمع مخروطی
جابه‌جایی متناظر ۵ درصد قطر پره	جابه‌جایی متناظر ۱۰ درصد قطر پره			
۱۴/۱	۲۷/۱	۴	۲۰۰	CHW 6.3.3
۲۳/۳	۴۱	۴	۴۰۰	CHW 6.3.3
۲۷	۴۴	۴	۴۵۰	CHW 6.3.3

۳-۵- مقایسه عملکرد دو اثر نصب خشک و مرطوب

در شکل ۱۴ نمودار بار-جابجایی و مقادیر ظرفیت باربری در تغییر شکل معادل در حالت $(S/D=3)$ با عمق نصب ۶ متر به روش نصب مرطوب با فشار آب ۴ بار و در حالت خشک، تحت تنش‌های نصب متفاوت ارائه شده است.

بیشترین ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی در تنش نصب خشک ۴۵۰ کیلوپاسکال برابر با ۹۸/۸ کیلونیوتن در نشست ۱۰ درصد قطر میانگین پره مشاهده شده، در حالی که در همین تنش نصب در ۵ درصد جابجایی قطر پره مقدار ۶۰/۹ کیلو نیوتن بدست آمده است. به طور مشابه در حالت مرطوب این اعداد به ترتیب برابر با ۴۴ و ۲۷ کیلونیوتن بوده است. با افزایش تنش سربار میزان ظرفیت باربری بیشتر شده که در حالت خشک در تنش نصب ۴۵۰ کیلوپاسکال نسبت به تنش نصب ۲۰۰ کیلوپاسکال با افزایش ضریب ۱/۴ برابری در ۱۰ درصد قطر میانگین پره و در حالت مرطوب این روند صعودی برابر با ضریب ۱/۶۲ بوده است. در نشست ۵ درصد قطر میانگین پره در حالت‌های نصب خشک و مرطوب این ضریب افزایشی به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۱/۹ می‌باشد. با توجه به ضرایب افزایشی بیشتر در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره‌ها در حالت نصب مرطوب، نشان‌دهنده اثرگذاری روش نصب مرطوب و همچنین اثر فشار آب در تراکم خاک لس و بهسازی ساختار خاک می‌باشد.



شکل ۱۴: مقایسه ظرفیت باربری در حالت نصب خشک و مرطوب

Fig. 14: Comparison of Ultimate Load in Dry and Wet Conditions

مطابق با شکل ۱۴، مقایسه بین دو اثر در شرایط خشک (CHD) و مرطوب (CHW) نشان می‌دهد که عملکرد ظرفیت باربری شمع‌ها در شرایط خشک به مراتب بهتر بوده است. به طور خاص، در تنش نصب ۲۰۰ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری در نشست ۵ درصد از ۱۴/۱ کیلو نیوتن در حالت مرطوب به ۴۱/۰ کیلو نیوتن در حالت خشک افزایش یافته که معادل افزایش ۱۹۱ درصدی است. در همین تنش نصب و برای نشست ۱۰ درصد، مقدار ظرفیت باربری از ۲۷/۱ به ۷۰/۵ کیلو نیوتن رسیده و ۱۶۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد. با افزایش تنش نصب به ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلو نیوتن نیز همین روند مشاهده می‌شود؛ در تنش نصب ۴۰۰ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری در نشست ۵ درصد، ۱۴۵ درصد و در نشست ۱۰ درصد، ۱۴۰ درصد افزایش داشته است. همچنین، در تنش نصب ۴۵۰ کیلو نیوتن، مقدار افزایش در نشست‌های ۵ و ۱۰ درصد برابر ۱۲۵ درصد برآورد شده است. شمع‌های مارپیچ به روش نصب خشک ظرفیت باربری بالاتری نسبت به شمع‌های نصب شده به روش مرطوب دارند. این تفاوت به علت استفاده از آب در روش نصب مرطوب و تأثیر آن بر تغییر وضعیت تنش مؤثر خاک در طول آزمایش بارگذاری استاتیک شمع‌ها می‌باشد. به همین دلیل، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در روش نصب مرطوب نسبت به روش نصب خشک کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این، افزایش تنش نصب باعث ایجاد تنش در زیر هر پره شمع مارپیچ می‌شود که این تنش‌ها موجب تخریب ساختار لانه‌زنبوری خاک لس گردیده و در نهایت، پتانسیل فروریزشی در هر دو روش نصب خشک و مرطوب کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودار فوق و مقایسه دو روش نصب خشک و مرطوب پس از مرطوب نمودن خاک اختلاف کمتری با افزایش تنش‌های نصب ایجاد شده و نرخ افزایش در حالت مرطوب در ۵ و ۱۰ درصد قطر میانگین پره ۱/۹ و ۱/۶۲ برابر در مقایسه با روش خشک می‌باشد که نشان‌دهنده این است ساختار پایدارتری نسبت به روش نصب خشک ایجاد کرده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از سه تکنیک هم‌زمان، مرطوب‌سازی با رویکرد غرقاب‌سازی و استفاده از نیروی فشاری در انتهای شمع با رویکرد متراکم‌سازی و استفاده از شمع به عنوان تسلیح‌کننده خاک استفاده شده است. تمامی آزمایش‌های بارگذاری شمع برای شرایط خشک و مرطوب خاک لسی رمبده با در نظر گرفتن کلیه جوانب اقتصادی و فنی و اجرایی در میدان انجام شده است. هشت عدد شمع تحت آزمایش بارگذاری فشاری استاتیکی سریع بر روی خاک‌های لسی واقع در منطقه داشلی برون قرار گرفته و نتایج حاصل به صورت زیر قابل بیان بوده است:

- در روش نصب خشک شمع‌های پیچشی، چرخش پره‌ها در درون خاک، ساختار آن را به هم ریخته و استفاده از نیروی فشاری در پشت شمع هم‌زمان با حرکت رو به پایین شمع سبب می‌شود خاک زیر پره‌ها فشرده می‌شود. در روش نصب مرطوب، علاوه بر عملکرد تخریبی پره‌ها هنگام نفوذ و اثر تراکمی نیروی فشاری در پشت شمع، فشار آب نیز سبب تخریب ساختار خاک می‌شود. همچنین به جهت مقاومت بالای خاک‌های لسی، نفوذ شمع در حالت خشک نیاز به اعمال نیروی پیچشی بالایی دارد که استفاده از آب تحت فشار هنگام اجرای شمع، سبب راحتی نصب می‌شود.
- در فشار آب کم، آب به عنوان عامل کاهنده اصطکاک بین دانه‌ها به خوبی عمل نکرده و خاک کمتر متراکم می‌شود. همچنین در فشار آب زیاد ذرات خاک شسته شده و جابه‌جایی زیادی داشته و این دلیل سبب عملکرد ضعیف‌تر و ظرفیت باربری کمتر شمع می‌شود، در نتیجه در فشار آب بهینه ظرفیت باربری به مقدار حداکثر خود رسیده که مناسب‌ترین فشار جهت اجرای شمع‌های پیچشی پره‌ای مخروطی بوده است.
- با افزایش تنش نصب میزان ظرفیت باربری در دو حالت خشک و مرطوب افزایش یافته است. ولی نرخ افزایش در حالت مرطوب بیشتر از حالت خشک بوده است که این موضوع نشان‌دهنده اثرگذاری روش نصب مرطوب و فشار آب در تراکم خاک لسی و بهسازی در ساختار خاک می‌باشد.
- در تحقیق‌های آتی می‌تواند اثر زمان بارگذاری بعد از اجرا بر ظرفیت باربری شمع‌های پیچشی پره‌ای و همچنین ضخامت ورق پره‌ها بر منحنی ظرفیت باربری – نشست بررسی گردد.

- [1] J. Wu, N. Yang, P. Li, C. Yang, Influence of moisture content and dry density on the compressibility of disturbed loess: A case study in Yan'an City, China, *Sustainability*, 15(7) (2023) 6212.
- [2] A. Zivari, M. Siavoshnia, H. Rezaei, Effect of lime-rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran, *International Journal of Geo-Engineering*, 14(1) (2023) 20.
- [3] A. Karimi, H. Khademi, M. Kehl, A. Jalalian, Distribution, lithology and provenance of peridesert loess deposits in northeastern Iran, *Geoderma*, 148(3-4) (2009) 241-250.
- [4] I. Jefferson, D. Evstatiev, D. Karastanev, The treatment of collapsible loess soils using cement materials, in: *GeoCongress 2008: Geosustainability and geohazard mitigation*, 2008, pp. 662-669.
- [5] A. Abdolrezayi, N. Khayat, Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations, *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(1) (2021) 19-36.
- [6] S. Clemence, A. Lutenecker, Industry survey of state of practice for helical piles and tiebacks, *DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute*, 9(1) (2015) 21-41.
- [7] M. Mahmoudi, E. Mohammad, M. Jalali Moghadam, *Mechanical Soil Restraints from Design to Implementation*, Amirkabir University 2016 (In Persian).
- [8] S. Clemence, A. Ghaly, A review of model-scale laboratory investigations of helical anchors and screw piles, in: *1st International geotechnical symposium on helical foundations*, 2013, pp. 25-45.
- [9] M. Arabameri, A. Eslami, Microstructure and strength effect on bearing capacity of helical piles installed in golestan loess, *International Journal of Civil Engineering*, 19(8) (2021) 923-940.
- [10] M. Arabameri, A. Eslami, Wet and dry installation effects on the capacity of helical piles in loess deposits, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(4) (2022) 486-498.
- [11] K. Shao, Q. Su, J. Liu, K. Liu, Z. Xiong, T. Wang, Optimization of inter-helix spacing for helical piles in sand, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3) (2022) 936-952.
- [12] R. Hoseinpour, M. Keramati, C. de Hollanda Cavalcanti Tsuha, Effect of the addition of a second helix on the helical pile performance in sand, *International Journal of Civil Engineering*, 22(2) (2024) 289-302.
- [13] A. Rahimi, A. Eslami, J.S. McCartney, Hyperbolic load-displacement analysis of helical and expanded piles: database approach, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 177(5) (2024) 448-467.
- [14] M. Esmailzade, A. Eslami, J.S. McCartney, Comparison of frustum confining vessel (FCV) and full-scale testing for helical and expanded piles geotechnical performance, *Marine Georesources & Geotechnology*, 43(2) (2025) 284-304.
- [15] H. Luo, F. Wu, J. Chang, J. Xu, Microstructural constraints on geotechnical properties of Malan Loess: a case study from Zhaojiaan landslide in Shaanxi province, China, *Engineering Geology*, 236 (2018) 60-69.
- [16] H. Yan, J. Ma, J. Niu, Z. Xie, Q. Wang, W. Zhu, X. Yang, Comprehensive Analysis of Collapsible Loess, in: *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2023, pp. 03007.
- [17] H.R. Asgari, A. Rashno, C. Bairramkomaki, A. Boali, E. Rashno, Investigation study of soil salinity mapping using Landsat data (case study: Dashli borun, Golestan province), (2020).
- [18] D.-. ASTM, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, D4318-17, (2017).
- [19] A. International, Standard test method for deep foundations under static axial compressive load, ASTM International, 2013.
- [20] H.A. Perko, *Helical piles: a practical guide to design and installation*, John Wiley & Sons, 2009.

[21] K.M. Tappenden, Predicting the axial capacity of screw piles installed in Western Canadian soils, (2007).

[22] K. Terzaghi, Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations, in: Proceedings, ASCE, 1942, pp. 311-323.