

تعیین پارامترهای رفتاری آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران به کمک آزمایش‌های پرسیمتری برجا و آزمایشگاهی

محمد امامی* (دکتری)

سید شهاب‌الدین یثربی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

محمدحسن بازیار (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ (۳۳-۳۵)
دوری ۲- ۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۵۵-۳۳

پیش‌بینی رفتار آبرفت درشت‌دانه در مهندسی ژئوتکنیک، یکی از مهم‌ترین مسائل است، که در گذشته تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی آن انجام شده است. رفتار ژئوتکنیکی آبرفت درشت‌دانه در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. هدف اصلی این نوشتار تعیین پارامترهای مؤثر در رفتار آبرفت درشت‌دانه به کمک دستگاه چمبر و آزمایش پرسیمتری است. طراحی و ساخت دستگاه چمبر جهت انجام آزمایش پرسیمتری در این پژوهش انجام شده است. به منظور بررسی اثر سیمان‌تاسیون تعدادی آزمایش پرسیمتری بالغ بر 10° آزمایش در محل، در اعماق مختلف در آبرفت درشت‌دانه انجام شده است. همچنین با شبیه‌سازی شرایط محل در محیط آزمایشگاه بدون سیمان‌تاسیون، تعدادی آزمایش پرسیمتری در دستگاه چمبر انجام شده است. در نهایت، نتایج آزمون‌های انجام‌شده با یکدیگر مقایسه و پارامترهای رفتاری مختلف ژئوتکنیکی آبرفت درشت‌دانه گزارش شده است.

واژگان کلیدی: رفتار آبرفت درشت‌دانه، اثر سیمان‌تاسیون، دستگاه چمبر، آزمایش پرسیمتری، مدل‌سازی فیزیکی.

۱. مقدمه

نیایش و... شناخت رفتار این نوع خاک بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. اولین پژوهشی که در این بخش بدان اشاره شده است، تأثیر سیمانی‌شدن در رفتار مکانیکی و مقاومتی خاک‌های درشت‌دانه‌ی مطالعه‌ی موردی آبرفت تهران در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ است، که در آن اثر چگالی و درصد سیمان‌تاسیون در رفتار یک ماسه‌ی شن‌دار به‌صورت موردی بررسی شده است. لذا به این منظور تعدادی نمونه از آبرفت تهران اخذ و در آزمایشگاه دانه‌بندی و سپس با رسم پوشش آزمایش‌های دانه‌بندی انجام‌شده، مصالح با ۶٪ ریزدانه، ۴۹٪ ماسه و ۴۵٪ شن برای ادامه‌ی تحقیق انتخاب شده است.^[۱] «بررسی اثر سیمان‌گچی در رفتار آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران» عنوان پژوهش دیگری است که در سال ۲۰۰۵ انجام شده و در آن رفتار خاک‌های ماسه‌یی درشت‌دانه تحت اثر سیمان‌گچی مورد مطالعه قرار گرفته و با انجام آزمایش‌های متعدد کشش برزیلی، فشار تک‌محوری و فشار سه‌محوری از نوع تحکیم‌یافته‌ی زهکشی‌شده، رفتار مکانیکی خاک با سیمان‌تاسیون گچی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.^[۲] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸، خصوصیات ژئوتکنیکی آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران با تکیه بر نتایج آزمون‌های برجا مورد بررسی قرار گرفته است.^[۳] در سال ۲۰۱۰ نیز، مدل‌های رفتاری آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران و همچنین مدل‌های رفتاری مختلفی جهت کاربرد در مدل‌سازی رفتار آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران مورد ارزیابی قرار گرفت.^[۴]

پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت درشت‌دانه در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. با توجه به عوامل تأثیرگذار مختلف در رفتار مذکور، شناخت این عوامل نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار آبرفت درشت‌دانه دارد. در مسائل مختلف مهندسی ژئوتکنیک اعم از ظرفیت باربری پی و شمع، گودبرداری و دیوارهای حائل و... رفتار این نوع خاک‌ها با مدل‌های رفتاری معمول مورد استفاده مطابقت ندارد. بنابراین مدل‌سازی دقیق رفتار این نوع خاک به همراه شناخت تمامی عوامل تأثیرگذار به‌خوبی احساس می‌شود. پارامترهای ژئوتکنیکی ذکرشده شامل پارامترهای تغییرشکلی مانند مدول تغییرشکل (E) و مدول واکنش بستر (K_s)، پارامترهای مقاومت برشی از جمله ضریب چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) و پارامترهای خاصی از قبیل فشار حدی (P_L) و نسبت بیش تحکیمی (OCR) هستند، که در رفتار آبرفت درشت‌دانه مؤثر هستند.

طی سال‌های اخیر، پیش‌بینی رفتار آبرفت درشت‌دانه همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف بوده است. همچنین با توجه به وجود لایه‌های آبرفتی درشت‌دانه در مقطع ژئوتکنیکی بیشتر مناطق شهری و تعریف پروژه‌های مختلف در محدوده‌ی ذکرشده مانند تهران بزرگ و پروژه‌هایی از قبیل خطوط مختلف مترو، تونل صدر-

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۳/۷/۲۷، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۱۷.

r_m_emami@yahoo.com
yasrobis@modares.ac.ir
baziar@iust.ac.ir

نتایج مقایسه‌ی مذکور جهت بررسی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌های ماسه‌یی سیلتی و نحوه‌ی رفتار این نوع خاک‌ها استفاده شده است. با توجه به آنکه شناخت پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آبرفت درشت‌دانه در انواع پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک لازم است، بنابراین هدف اصلی این نوشتار تعیین پارامترهای رفتاری آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران به کمک نتایج آزمایش پرسیمتری است. در این نوشتار چگونگی استخراج این پارامترها از روی نتایج آزمون‌های پرسیمتری انجام شده بر روی آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران به صورت در محل و آزمایشگاهی بررسی شده است. سپس نتایج این بررسی‌ها و نحوه‌ی تفسیر آزمون پرسیمتری توضیح داده شده است.

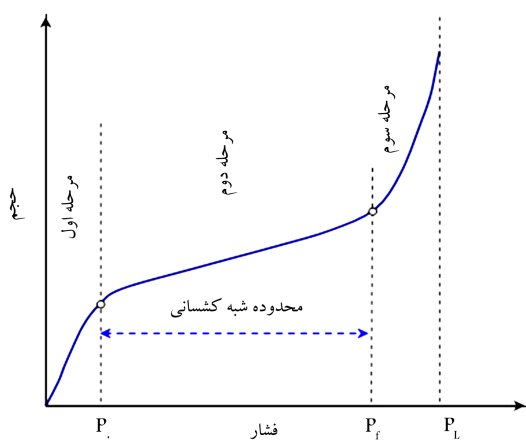
۲. آزمایش پرسیمتری

کلیدی آزمایش‌های لازم برای این پژوهش براساس استاندارد ASTM D4719 انجام شده است. آزمایش پرسیمتری یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های برجای مهندسی ژئوتکنیک است، که واقعی‌ترین تصور را نسبت به رفتار تغییرشکل‌ی خاک‌ها نسبت به سایر آزمایش‌ها نتیجه می‌دهد.^[۹]

لوتیس منارد در سال ۱۹۵۵ دستگاه پرسیمتر را طراحی کرده و این نام را برای آن برگزیده است. برخی پرسیمتر را ابزاری استوانه‌یی شکل معرفی کرده‌اند، که برای اعمال فشار یکنواخت از طریق پوسته‌ی انعطاف‌پذیر به دیواره‌ی گمانه به‌کار می‌رود؛ که این تعریف متعاقباً توسط انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی پی به‌عنوان تعریف بین‌المللی پرسیمتر شناخته شده است.^[۸،۳]

در آزمایش پرسیمتری، ابتدا سوند پرسیمتر در داخل زمین و در عمق موردنظر قرار می‌گیرد و سپس توسط فشارگاز، آب، یا روغن منبسط می‌شود. منحنی فشار-جاب‌جایی (حجم) رسم می‌شود و متغیرهای مهندسی خاک، محصول ثانویه‌ی این منحنی‌ها هستند. شکل ۱، نمونه‌یی از منحنی فشار-حجم حاصل از آزمایش پرسیمتری را نشان می‌دهد.^[۱]

دستگاه پرسیمتری مورد استفاده از نوع پرسیمتری پیش‌حفراری شده است. برای قراردادن این پرسیمترها در داخل زمین نیاز به حفر و آماده‌کردن گمانه است. این پرسیمترها فراگیرترین نوع پرسیمتر در مطالعات ژئوتکنیک هستند. در این نوشتار از دستگاه پرسیمتری منارد استفاده شده و روش انجام آزمایش پرسیمتری براساس استاندارد ASTM D4719 بوده است.



شکل ۱. نمونه‌یی از نمودار حاصل از آزمایش پرسیمتری.^[۱۰]

مدل‌های رفتاری به صورت بسیار وسیعی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به‌کار می‌روند. استفاده از مدل رفتاری مناسب با نوع خاک و یا مسئله‌ی ژئوتکنیکی در دقت مدل‌سازی تأثیر به‌سزایی دارد. بسیاری از مدل‌های رفتاری، خصوصیات مصالح را به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌کنند. در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، مدول کشسانی خاک در آبرفت جنوب تهران مورد بررسی قرار گرفته و در آن، آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی متعدد بر روی زمین صدها پروژه‌ی در دست مطالعه‌ی شهرداری تهران توسط گروه دقیق و کنترل‌شده انجام و نتایج حاصل بررسی شده است. نتایج مطالعه‌ی مذکور نشان داده است که همبستگی قابل توجهی میان نتایج آزمون نفوذ استاندارد و مدول کشسانی خاک که از آزمون‌های بارگذاری صفحه‌یی، برش مستقیم و سه‌محوری به‌دست آمده است، وجود دارد. لذا به منظور ارائه‌ی روابط کاربردی برای برآورد مدول کشسانی در آبرفت جنوب تهران، با توجه به مناطق شهرداری، جنوب تهران به ۳ بخش تقسیم و برای هر بخش رابطه‌هایی برای محاسبه‌ی مدول کشسانی ارائه شده است.^[۱]

یکی از روش‌های شناخت بهتر رفتار خاک‌ها، استفاده از نتایج آزمون‌های برجای مهندسی ژئوتکنیک است. پژوهشگران مختلفی با شبیه‌سازی شرایط برجای خاک‌های مختلف سعی در شناخت بهتر رفتار این قبیل خاک‌ها کرده‌اند. لذا برای این منظور طراحی و ساخت دستگاه چمبر آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته و به کمک آن، آزمون‌های مختلف برجای مهندسی ژئوتکنیک قابلیت انجام در محیط آزمایشگاه را پیدا کرده‌اند. آبرفت‌های درشت‌دانه با سیمان‌تاسیون به علت حساسیت زیاد رفتاری، بیشترین مورد را در بررسی و مدل‌سازی فیزیکی به نحو اشاره‌شده‌ی پیشین داشته‌اند. تاریخچه‌ی ساخت دستگاه چمبر آزمایشگاه به سال ۱۹۸۲ بر می‌گردد.^[۲] این چمبر جهت انجام آزمایش SPT در محیط آزمایشگاه ساخته شده است.

برخی پژوهشگران پیشگام در استفاده از چمبر جهت مدل‌سازی شرایط برجا (۱۹۹۰)،^[۴] چمبری جهت مدل‌سازی رفتار رس‌های چسبیده ساختند و همچنین دو سال بعد، از آزمون پرسیمتری مقیاس کوچک جهت بررسی رفتار این نوع خاک استفاده کردند. در دهه‌ی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰، در برخی پژوهش‌ها از دستگاه چمبر و آزمون پرسیمتری خودحفر جهت بررسی رفتار خاک‌ها استفاده شده است.^[۵] بعدها در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۸،^[۶] مطالعاتی در زمینه‌ی تأثیر ابعاد پرسیمتری در نتایج این آزمون در دستگاه چمبر آزمایشگاهی انجام و در آن، به بررسی نتایج آزمون‌های پرسیمتری کوچک مقیاس پرداخته و پیشنهادهای جهت انجام پرسیمتری در مقیاس واقعی ارائه شده است. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۱، نیز طراحی و ساخت چمبری آزمایشگاهی جهت بررسی رفتار خاک‌های غیراشباع در دستور کار قرار داده شده است. همچنین در سال ۲۰۰۴،^[۷] به بررسی رفتار خاک‌های غیراشباع به کمک آزمون پرسیمتری در مقیاس کوچک در دستگاه چمبر پرداخته شده است.

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۵، رفتار خاک‌های سیلتی به کمک آزمایش پرسیمتری و نفوذ مخروط مورد بررسی قرار گرفته و تعدادی از آزمایش‌های برجای جهت مدل‌سازی شرایط واقعی (در محل) در آزمایشگاه به کمک شبیه‌سازی انجام و در نهایت، پارامترهای حاصل با نتایج در محل مقایسه و نتیجه‌گیری‌ها حاصل شده است. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،^[۸] جهت بررسی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌های ماسه‌یی سیلتی از آزمایش پرسیمتری سیکلیک در مقیاس کوچک در دستگاه چمبر آزمایشگاهی استفاده و نتایج آزمون‌های سیلندر توخالی ضخیم^۱ با آزمون‌های پرسیمتری سیکلیک در مقیاس کوچک مقایسه شده است. سپس از

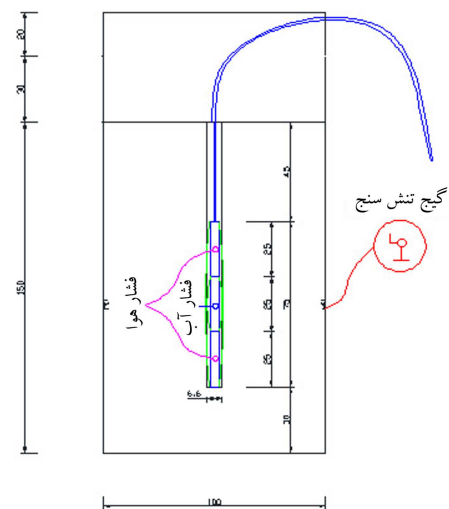
۳. دستگاه چمبر (محفظه‌ی آزمایشگاهی)

پژوهشگران مختلف جهت شبیه‌سازی شرایط برجا در محیط آزمایشگاه، از محفظه‌ی آزمایشگاهی به اصطلاح چمبر استفاده می‌کنند، که در بخش اول تاریخچه‌ی این دستگاه ارائه شده است. این محفظه‌ها بسته به شرایط پژوهش و نوع مدل‌سازی می‌توانند از جنس مصالح مختلف از قبیل چوب، پلاستیک، فولاد، بتن و... ساخته شوند. در این پژوهش با توجه به مدل‌سازی شرایط برجای آبرفت درشت‌دانه به همراه سیمان‌تاسیون و تنش برجای موردنظر از فولاد جهت ساخت دستگاه چمبر استفاده شده است. شکل ۲، شمایی از ساخت دستگاه چمبر را نشان می‌دهد. براساس منتشرات ارائه‌شده در بخش مقدمه و همچنین پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی اثر ابعاد پرسیمتری در نتایج آزمون‌های انجام‌شده در داخل این دستگاه و با توجه به ابعاد دستگاه مورد استفاده در این پژوهش ضریب مقیاس برابر واحد است. چمبر مورد استفاده در این پژوهش قطری برابر ۱ متر و ارتفاعی معادل ۲ متر دارد. این ابعاد براساس سوند پرسیمتری و به کمک محاسبات کنترل اثر صلبیت جداره تعیین شده‌اند.

برای بررسی وضعیت توزیع تنش و کرنش در فضای اطراف سوند پرسیمتری و کنترل اثر صلبیت فولاد در رفتار خاک داخل چمبر از گیج‌های تنش‌سنج استفاده شده است. همچنین با استفاده از معادلات تجربی مانند کرشهوف و تیموشنکو و گودیر، ابعاد دستگاه کنترل شده است تا از همه لحاظ اطمینان حاصل شود که صلبیت دیواره در رفتار خاک تأثیر زیادی ندارد. در معادلات مذکور این فرضیات در نظر گرفته شده است:

- سوند پرسیمتری بدون هیچ‌گونه دست‌خوردگی جدار گمانه در داخل خاک قرار می‌گیرد.
- زمین اطراف سوند همگن و همسان‌گرد است.
- سوند به‌صورت قائم در داخل حفره قرار دارد.
- نسبت طول به قطر سوند به حد کافی بزرگ است، به نحوی که می‌توان آن را به‌صورت حفره‌ی بی‌نهایت طویل در نظر گرفت.

با توجه به فرضیات ذکرشده، توزیع تنش و کرنش در اطراف سوند مورد بررسی قرار گرفته است. در شروع آزمایش، شعاع سوند به‌صورت حفره بوده و فشار داخلی



شکل ۲. شمایی از ساخت دستگاه چمبر و سوند پرسیمتری.

سوند، معادل فشار کل افقی برجای خاک در عمق زمین بوده است. با افزایش فشار P تا فشار P_i ، حفره در جهت شعاعی تا نقطه‌ی P_i منبسط می‌شود. با توجه به اینکه طول حفره نسبت به قطر آن خیلی بزرگ‌تر است، لذا تمامی جابه‌جایی‌ها در جهت شعاعی خواهد بود. از آنجایی‌که خاک همگن و همسان‌گرد فرض شده است، لذا می‌توان از تقارن محوری در تحلیل‌ها استفاده کرد. اگر تنش قائم قبل از شروع آزمایش یک تنش اصلی تلقی شود، آنگاه تنش‌های شعاعی، محیطی، و قائم اطراف حفره، تنش‌های اصلی را تشکیل می‌دهند و تا پایان آزمایش نیز به‌عنوان تنش‌های اصلی باقی خواهند ماند.

براساس روابط موجود در بحث تنش - کرنش سلول پرسیمتری و همچنین بررسی و مقایسه‌ی صحت روابط در محیط کشسان و کشسان‌خمیری حاصل و با توجه به ۱۸ برابر بودن قطر چمبر نسبت به قطر سوند پرسیمتری، اثر صلبیت دیواره‌های فولادی در رفتار تنش - کرنش خاک به میزان کمیسه رسیده است. با وجود این، با استفاده از گیج‌های تنش‌سنج که در دیواره‌ی چمبر تعبیه شده است، میزان تنش افقی وارده بررسی شده است.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

بر مبنای هدف اصلی این نوشتار که بررسی رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه به کمک دستگاه چمبر و آزمایش پرسیمتری است، برنامه‌ی آزمایش‌ها اعم از نوع آزمایش، شرایط انجام آزمایش، تفسیر نتایج و مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌ها تدوین شده است. بر این اساس آزمایش پرسیمتری که به گواهی بیشتر پژوهشگران مهندسی ژئوتکنیک، واقعی‌ترین تصویر از رفتار تنش - کرنش خاک را ارائه می‌دهد، به‌عنوان آزمایش منتخب برگزیده شده است. مطالعات پیشین انجام‌شده بر روی رفتار آبرفت درشت‌دانه به علت محدودیت‌های موجود از محدودیت‌های زمانی گرفته تا هزینه و امکانات به زمینه‌ی خاصی محدود شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به پژوهش‌های ارائه‌شده در بخش مقدمه رجوع کرد. یکی از مهم‌ترین نکات پژوهش‌های پیشین، استفاده از پرسیمتری مقیاس کوچک بوده است. در این آزمون‌ها، ۳ عامل عمق انجام آزمایش، وزن مخصوص و دانه‌بندی مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس ۴ عمق به ترتیب سطحی ۳/۵ تا ۴/۵ متری، عمق متوسط ۷/۵ تا ۸/۵ و ۱۲ تا ۱۳ متری و عمیق ۱۶ تا ۱۷ متری انتخاب شده‌اند. همچنین دو نوع خاک شنی رس‌دار (GC) و ماسه‌یی رس‌دار (SC) جهت بررسی رفتار آبرفت درشت‌دانه انتخاب شده‌اند. همچنین جهت بازسازی شرایط برجا از نتایج آزمون‌های تعیین وزن مخصوص استفاده شده است.

بنابراین جهت مطالعه‌ی بهتر رفتار تنش - کرنش این نوع خاک، منحنی تنش - کرنش آن تحت آزمایش پرسیمتری بررسی شده است. برای نیل به این منظور با توجه به منحنی مذکور و نحوه‌ی استخراج پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آبرفت درشت‌دانه، این پارامترها تعیین و در آزمون‌های مختلف ارائه شده‌اند.

بنابراین جهت مطالعه‌ی بهتر رفتار تنش - کرنش این نوع خاک، منحنی تنش - کرنش آن تحت آزمایش پرسیمتری در حالت برجا و آزمایشگاهی بررسی شده است. برای نیل به این منظور تعدادی آزمایش پرسیمتری در شرایط واقعی و با وجود اثر سیمان‌تاسیون در آبرفت درشت‌دانه انجام شده است. سپس جهت بررسی رفتار آبرفت درشت‌دانه و اثر سیمان‌تاسیون تعدادی آزمایش پرسیمتری در محیط آزمایشگاه به کمک بازسازی شرایط برجا و بدون اثر سیمان‌تاسیون انجام شده است.

۱.۴. آزمون‌های پرسیمتری برجا

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، آزمایش پرسیمتری به این علت که واقعی‌ترین تصویر از رفتار تنش - کرنش خاک را به دست می‌دهد، به عنوان آزمون موردنظر در این پژوهش انتخاب شده است. این آزمایش در داخل گمانه با استفاده از سوند^۲ استوانه‌بی‌شکل، که می‌تواند به صورت شعاعی متورم شود، انجام می‌شود. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان این پارامترها را به دست آورد:

-- مدول تغییرشکل (E):

-- مدول واکنش بستر (K_s):

-- تنش افقی برجا (P_h):

-- مقاومت برشی زهکشی‌نشده (C_u) برای رس‌ها و سنگ‌های ضعیف؛

-- مدول برشی (G):

-- فشار حدی (P_L):

-- شرایط بیش‌تحکیمی.

تفاوت بین انواع پرسیمترها، نحوه‌ی قرارگیری آنها داخل گمانه است. پرسیمترهای متداول ۳ نوع هستند:

-- در داخل گمانه‌های آماده مستقر می‌شوند (P.B.P).

-- خودحفار هستند (S.B.P).

-- با فشار داخل زمین قرار می‌گیرند، که به این نوع، پرسیمتر رانشی هم گفته می‌شود (P.I.P).

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش از نوع P.B.P و مدل GC است، که موسوم به پرسیمتر منارد است. اساس کار دستگاه پرسیمتری بر انبساط یک استوانه‌ی بلند است، که در داخل یک گمانه قرار می‌گیرد. تغییرات فشار و حجم مربوط به آن در طول آزمایش قابل اندازه‌گیری است. در شکل ۳، دستگاه پرسیمتری مورد استفاده در این مطالعات نشان داده شده است. آزمایش پرسیمتری با سوند ۴۴ میلی‌متری (سایز AX) مستقر در تیوب فلزی شکاف‌دار^۳ انجام شده است.

آزمون‌های پرسیمتری بر روی آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران در پروژه‌هایی مانند احداث تونل صدر - نیاش، پارکینگ طبقاتی ملت و زیرگذر آرش انجام شده‌اند.



شکل ۳. تصویری از انجام آزمایش پرسیمتری در حالت برجا.

جهت بررسی رفتار تنش - کرنش این نوع خاک، از نتایج اعمای استفاده شده است، که داده‌های ژئوتکنیک به میزان کافی جهت بهسازی شرایط برجا وجود داشته است. در شکل ۴، تصویری از مصالح ذکرشده و همچنین تعدادی از منحنی‌های دانه‌بندی لایه‌های آبرفتی موردنظر در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۲.۴. آزمون‌های پرسیمتری در محیط آزمایشگاه

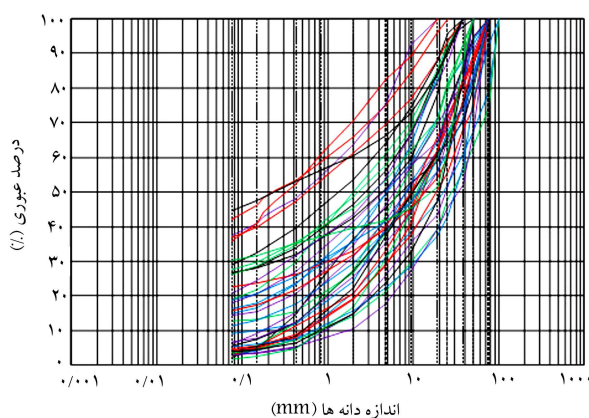
همان‌طور که در بخش سوم درباره‌ی نحوه‌ی طراحی و ساخت دستگاه چمبر آزمایشگاهی بیان شده است، جهت انجام آزمون‌های پرسیمتری در محیط آزمایشگاه و بررسی رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه از دستگاه چمبر استفاده شده است. برای این منظور ابتدا دانه‌بندی خاک در شرایط محل بازسازی و سپس به منظور بازسازی شرایط محل با استفاده از فک بالایی دستگاه فشار همه‌جانبه متناسب با عمق موردنظر اعمال شده است. تصاویری از خاک‌های بازسازی‌شده، منحنی‌های دانه‌بندی و دستگاه چمبر در شکل‌های ۶ الی ۸ ارائه شده‌اند. برای افزایش دقت آزمون‌ها و همچنین بازسازی کامل شرایط محل، از دستگاه پرسیمتری منارد استفاده شده است.

همچنین آزمون‌های درصد رطوبت و وزن مخصوص و تراکم نیز جهت اطمینان از شرایط شبیه‌سازی انجام شده است. براساس مطالب ذکرشده جهت انجام آزمون‌های پرسیمتری در محیط آزمایشگاه، شرایط برجای خاک کاملاً به صورت فیزیکی مدل‌سازی شده است. این شرایط آزمایش عبارت‌اند از:

۱. طبقه‌بندی خاک؛



شکل ۴. تصویری از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه‌ی تهران.



شکل ۵. محدودی دانه‌بندی خاک‌های آبرفتی درشت‌دانه.

نیایش، پارکینگ ملت، و زیرگذر آرش تقاطع بزرگراه مدرس، که غالب پرسیومتری‌های انجام‌شده‌ی آنها بر روی آبرفت درشت‌دانه با طبقه‌بندی شن رس‌دار (GC) و ماسه‌ی رس‌دار (SC) بوده است. با استفاده از اطلاعات ذکرشده، شرایط برجای محل به طور مناسب در چمبر آزمایشگاهی مدل‌سازی فیزیکی شده است.

۵. تفسیر آزمون‌های پرسیومتری

یکی از مهم‌ترین مراحل این پژوهش، تفسیر درست نتایج آزمون‌های پرسیومتری است. مراحل تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش پرسیومتری عبارت‌اند از:

۱. تعیین اختلاف فشار بین سلول محافظ و هسته‌ی اندازه‌گیر (P_c) براساس نتیجه‌ی آزمایش هم‌سنجی که نمونه‌ی از نمودار هم‌سنجی فشار و حجم نیز در شکل ۹ ارائه شده است.

۲. تعیین فشار هیدروستاتیک بین سوند و واحد کنترل (P_δ) که از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$P_\delta = H \times \gamma_1 \quad (1)$$

که در آن، H عمق قرارگیری سوند نسبت به واحد کنترل و γ_1 وزن واحد حجم آب اندازه‌گیری دستگاه است.

۳. اصلاح داده‌های آزمایش پرسیومتری براساس اصلاحات محاسبه‌شده از بندهای ۱ و ۲، که مطابق رابطه‌ی ۲ صورت می‌گیرد:

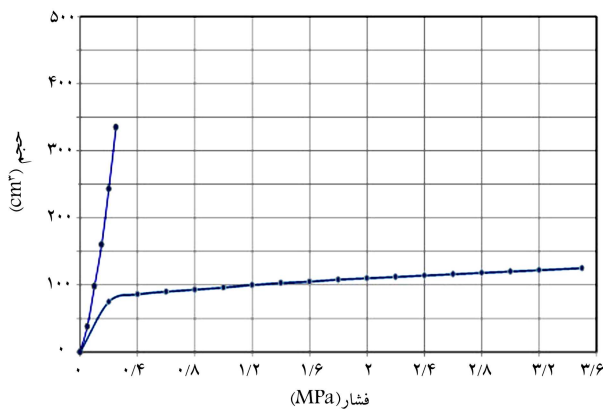
$$P = P_{pressuremeter} + P_\delta - P_c \quad (2)$$

۴. رسم منحنی فشار - تغییر حجم مشابه شکل ۱.

۵. تعیین مقادیر ΔP ، ΔV و V_m از روی شکل ۱ (ΔP تغییرات فشار اصلاحی در قسمت خطی نمودار؛ ΔV تغییرات حجم اصلاحی در قسمت خطی نمودار؛ V_m حجم اصلاحی در وسط محدوده‌ی افزایش حجم ΔV).

۶. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده از مرحله‌ی ۵ و مقدار V_0 (حجم قسمت اندازه‌گیری سوند هنگامی که هنوز افزایش حجم پیدا نکرده است و در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود)، ضریب پرسیومتری یا E_p (مدول منارد یا E_M) از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$E_M = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (3)$$



شکل ۹. نمونه‌ی از نمودار هم‌سنجی فشار و حجم.

۲. وزن مخصوص و درصد رطوبت؛

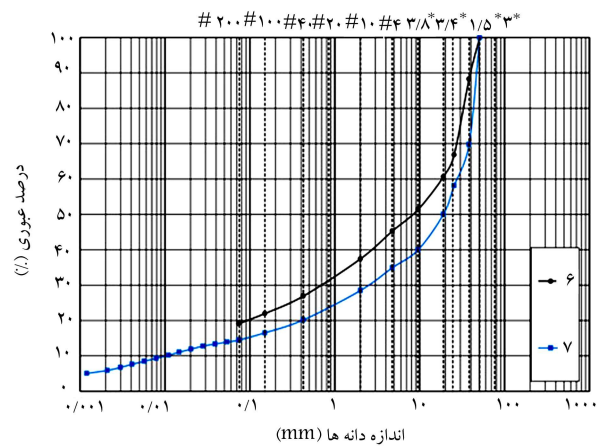
۳. تنش همه‌جانبه؛

۴. گام‌های فشاری آزمایش پرسیومتری.

بنابراین سعی شده است تا تمامی شرایط ذکرشده جهت انجام هر آزمون پرسیومتری متناظر با عمق موردنظر فراهم شود. به این منظور از نتایج مطالعات ژئوتکنیک ۳ پروژه‌ی بزرگ انجام‌شده بر روی آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران از سوی شرکت پژوهش عمران راهوار استفاده شده است. این سه پروژه عبارت‌اند از: تونل صدر -



شکل ۶. تصویری از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه‌ی بازسازی‌شده.



شکل ۷. نمونه‌ی از منحنی دانه‌بندی خاک‌های آبرفتی درشت‌دانه‌ی بازسازی‌شده‌ی آزمایش‌های انجام‌شده.



شکل ۸. نمایی از دستگاه چمبر (محفظه‌ی آزمایشگاهی).

باتوجه به محدوده‌ی خطی شکل ۱۰، مقدار V_0 برابر ۱۴۱ سانتی‌متر مکعب است. بنابراین براساس رابطه‌ی ۱۰، مقدار V_L برابر است با:

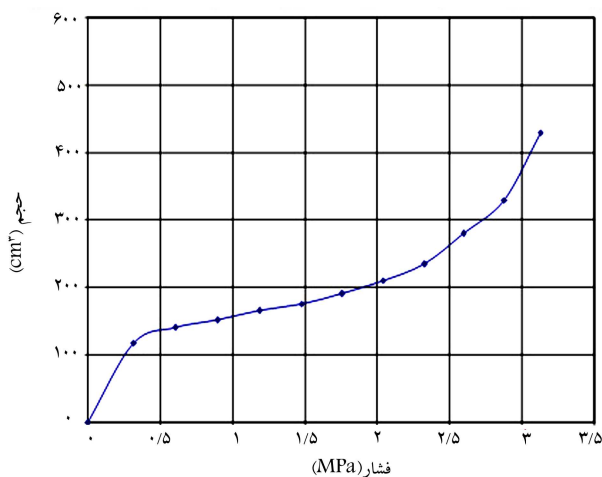
$$V_L = 2(V_0 + V_C) = 1352 \text{ cm}^3 \quad (10)$$

به این دلیل که آزمایش پرسیمتری تا حجم ۱۳۵۲ سانتی‌متر مکعب انجام نشده است، فشار حدی را نمی‌توان مستقیماً از روی شکل ۱۰ قرائت کرد. فشار باید در مقابل لگاریتم حجم در فاز خمیری رسم شود، تا از روش برون‌یابی مقدار فشار حدی به‌دست آید. این نمودار در شکل ۱۱ رسم شده است، که با توجه به آن معادله‌ی خط برون‌یابی به‌دست آمده و با استفاده از معادله‌ی مذکور مقدار فشار حدی برای حجم ۱۳۵۲ سانتی‌متر مکعب به‌دست می‌آید. این مقدار با توجه به معادله‌ی خط موردنظر برابر با ۳/۴ مگاپاسکال است.

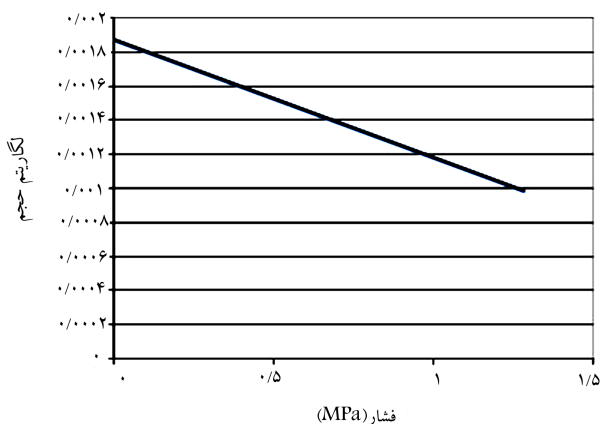
۲.۵. محاسبه‌ی مقاومت زهکشی نشده C_u

بین مقاومت برشی زهکشی‌نشده (C_u) و فشار حدی (P_L) مطابق جدول ۲ رابطه برقرار است.

با داشتن ضریب پرسیمتری (E_m) و فشار حدی (P_L) می‌توان به‌طور نسبی در مورد شرایط کلی خاک اظهارنظر کرد. برای مثال در خاک‌های بیش‌تحکیم‌یافته،



شکل ۱۰. نمودار فشار - تغییر حجم حاصل از یکی از آزمایش‌های پرسیمتری.



شکل ۱۱. نمودار فشار - لگاریتم حجم یکی از آزمایش‌های پرسیمتری.

همچنین مطابق روابط کشسانی و رابطه‌ی مدول پرسیمتری، مقدار مدول برشی از رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید:

$$G = (V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (4)$$

ضمناً با استفاده از رابطه‌های ۵ و ۶، مدول واکنش بستر خاک برای شمع قابل محاسبه است:

$$K_s = \left[\frac{4R}{9E_m} (2.765)^\alpha + \frac{\alpha}{3E_m} R \right]^{-1} \quad R \leq 0.3 \text{ m} \quad (5)$$

$$K_s = \left[\frac{4R}{9E_m} \left(2.765 \frac{R}{R_0} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{3E_m} R \right]^{-1} \quad R > 0.3 \text{ m} \quad (6)$$

مدول واکنش بستری که از رابطه‌های ۵ و ۶ به‌دست می‌آید، مدول واکنش بستر افقی خاک است و در محاسبات شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب α براساس جدول‌های تجربی موجود و نوع خاک محدوده‌ی مورد مطالعه بین ۰/۲۵ تا ۱ در نظر گرفته شده است. R شعاع شمع و R_0 شعاع شمع پایه است. همچنین شعاع شمع جهت محاسبات K_s برابر $R_0 = R = 0.3 \text{ m}$ فرض شده است.^[۱] ضریب پرسیمتری (E_m) با مدول کشسانی ($E'_s = E_{oed}$) که از آزمایش تحکیم به‌دست می‌آید، متناسب است. این تناسب به‌صورت رابطه‌ی ۷ است:

$$E'_s = E_{oed} = E_m / \alpha \quad (7)$$

مقدار α در خاک‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. در خاک‌های بسیار فشرده، مقدار α ممکن است بیش از ۱ باشد. مقدار مدول تغییرشکل به‌دست‌آمده از آزمایش پرسیمتری، مدول محدودشده است و با استفاده از رابطه‌ی ارائه‌شده توسط بولز تبدیل به مدول کشسانی می‌شود (رابطه‌ی ۸):^[۱]

$$E'_s = \frac{E'_s(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (8)$$

که در آن، ν نسبت پواسون است.

۱.۵. نحوه‌ی محاسبه‌ی فشار حدی

در مواردی که خاک سخت است و فشار حدی (P_L) از نمودار فشار - تغییر حجم مستقیماً به‌دست نمی‌آید، به این صورت می‌توان آن را تخمین زد:

نمودار فشار - تغییر حجم یک آزمایش پرسیمتری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نوع پرسیمتر مورد استفاده، حجم اولیه‌ی حفره V_0 برابر ۵۳۵ سانتی‌متر مکعب است. برطبق رابطه‌ی ۹، حجم موردنظر برای محاسبه‌ی فشار حدی به‌دست می‌آید:

$$V_L = V_0 + V_C + V_0 = 2(V_0 + V_C) \quad (9)$$

که در آن، V_0 حجم لازم برای بادکردن غشا و فشاردادن خاک تا حالت اولیه و V_C حجم اولیه‌ی سلول اندازه‌گیری است.

جدول ۱. مقدار α در خاک‌های مختلف.^[۱]

نوع خاک	رس	لای	ماسه	شن
α	۰/۶۷	۰/۵	۰/۳۴	۰/۲۵

قابل قبولی دارد. حتی در چند آزمون که امکان رسیدن به فشار بالای ۴ مگاپاسکال فراهم شده است، منحنی شروع به رسیدن به مجانب فشار حدی کرده است، ولی به دلیل ترکیدن غشاء لاستیکی امکان افزایش تا ۵ مگاپاسکال میسر نشده است. برخی از منحنی آزمون‌ها نیز آنها مطابقت خوبی با منحنی استاندارد نداشته است، که با توجه به عوامل مؤثر زیاد در نحوه اجرای این آزمون حتی با تکرار مجدد نیز در این آزمون‌ها عامل خطای خود را نشان داده است. در مجموع شیب منحنی‌های پرسیمتری خاک‌های شنی از خاک‌های ماسه‌یی کمتر به دست آمده است. ولی اعمال فشار همه‌جانبه در خاک‌های ماسه‌یی بهتر عمل کرده است.

با توجه به روابط ارائه شده، خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده‌ی برجا در جدول‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است. همچنین خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در دستگاه چمبر در جدول ۶ ارائه شده است.

در جدول‌های مذکور سعی شده است تا تمامی پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آبرفت درشت‌دانه‌ی تهران ارائه شوند. پارامترهای ژئوتکنیکی شامل پارامترهای تغییرشکلی مانند مدول تغییرشکل (E) و مدول واکنش بستر (K_s)، پارامترهای مقاومت برشی از جمله ضریب چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) و پارامترهای خاصی از قبیل فشار حدی (P_L) و نسبت بیش تحکیمی (OCR) هستند، که در رفتار آبرفت درشت‌دانه تأثیرگذار هستند.

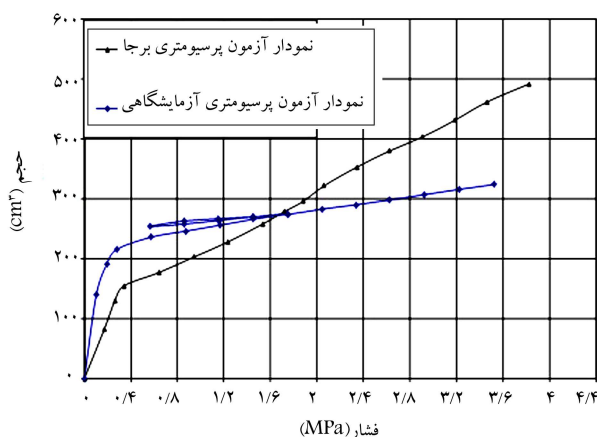
۷. بررسی و مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های انجام شده

پس از انجام آزمون‌های پرسیمتری در محیط آزمایشگاه و داخل دستگاه چمبر با شرایط بازسازی شده، جهت بررسی رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه، بهترین گزینه مقایسه‌ی نمودارهای حاصل از این آزمون‌ها با نمودارهای آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در شرایط برجاست. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، تصاویری از این مقایسه به ترتیب از اعماق ۷٫۵ متری تا ۱۱٫۵ متری ارائه شده‌اند.

براساس این منحنی‌ها و جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه شده در بخش ۶ می‌توان مقایسه‌ی جامعی در اثر سیمانتاسیون بر روی رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه انجام داد. بررسی این اثر از چند جنبه قابل مشاهده است:

-- تنش افقی برجا؛

-- محدوده‌ی شبه‌خطی؛



شکل ۱۴. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش در آزمایش‌های پرسیمتری برای عمق ۷٫۵ متری.

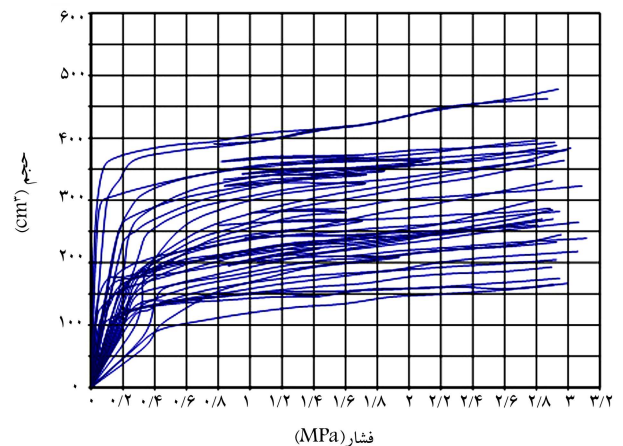
جدول ۲. ارتباط بین P_L و C_u [۱].

$P_L - \sigma_{h.}$ (kPa)	C_u (kPa)
< 300	$(P_L - \sigma_{h.}) / 5.5$
> 300	$((P_L - \sigma_{h.}) / 10) + 25$

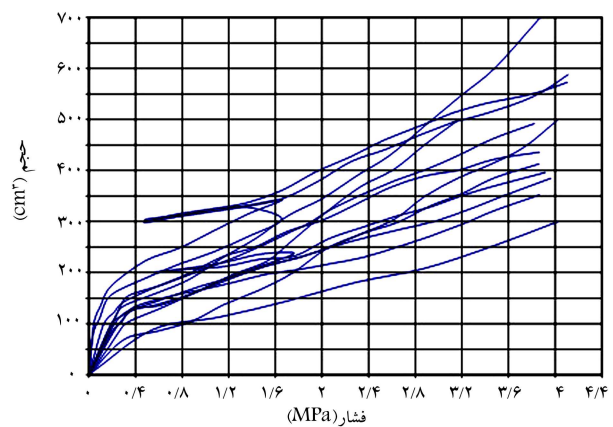
نسبت E_m / P_L یک مشخصه از خاک است و در برخی از مراجع به عنوان نسبت بیش تحکیمی (OCR) تعیین می‌شود.

۶. نتایج آزمایش‌های پرسیمتری

در این نوشتار، آزمون‌های پرسیمتری در شرایط برجاست و آزمایشگاهی انجام شده‌اند. در این بخش نتایج این آزمون‌ها ارائه شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، منحنی‌های پرسیمتری در شرایط برجاست و آزمایشگاهی را نشان می‌دهند. بر این اساس مشاهده می‌شود که شکل منحنی‌های پرسیمتری با شکل استاندارد این نمودار مطابقت مناسبی داشته و نتایج حاصل از تفسیر این نمودارها، اطمینان قابل قبولی دارد. زیرا شکل منحنی پرسیمتری می‌تواند بیانگر جزئیات بسیار زیادی از نحوه انجام آزمایش اعم از مناسب بودن حفره، جایگذاری درست، پله‌های بارگذاری مناسب خاک مورد آزمایش، و... باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، شکل منحنی‌های پرسیمتری آزمایشگاهی با منحنی معمول پرسیمتری استاندارد هم‌خوانی



شکل ۱۲. پوش منحنی تنش - کرنش در آزمایش‌های برجاست.



شکل ۱۳. پوش منحنی تنش - کرنش در آزمایش‌های آزمایشگاه.

جدول ۳. تعدادی از نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در پروژه‌ی تونل صدر - نیایش.

گمانه	عمق (m)	نوع خاک	α	E_m (kg/cm ²)	E_s (kg/cm ²)	P_L (kg/cm ²)	E_m/P_L	G (kg/cm ²)	K_s (kg/cm ²)	C_u (kg/cm ²)
NB-۱	۶٫۵ - ۵	GM	۰٫۲۵	۱۶۲	۴۵۲	۵۵٫۳	۲٫۹	۶۰٫۰	۸٫۷	۰٫۲۳
	۲۱٫۵ - ۲۰	GM	۰٫۲۵	۲۸۵	۷۹۷	۵۹٫۵	۴٫۸	۱۰۵٫۶	۱۵٫۴	۰٫۲۸
	۲۸٫۵ - ۲۷	GC	۰٫۲۵	۲۸۴	۷۹۴	۵۹٫۳	۴٫۸	۱۰۵٫۲	۱۵٫۳	۰٫۳۸
NB-۲	۸٫۵ - ۷	GM	۰٫۲۵	۹۸	۲۷۴	۱۲٫۳	۸٫۰	۳۶٫۴	۵٫۳	۰٫۳۱
	۱۳٫۵ - ۱۲	GC	۰٫۲۵	۲۵۹	۷۲۳	۵۵٫۶	۴٫۷	۹۶٫۰	۱۴٫۰	۰٫۳۶
	۲۳٫۵ - ۲۲	SC	۰٫۲۵	۲۱۲	۴۳۶	۱۰۶٫۰	۲٫۰	۷۸٫۵	۱۱٫۴	۰٫۴۸
	۳۰ - ۲۸٫۵	SM	۰٫۲۵	۲۷۴	۵۶۳	۵۶٫۵	۴٫۹	۱۰۱٫۵	۱۴٫۸	۰٫۲۹

جدول ۴. تعدادی از نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در پروژه‌ی پارکینگ ملت.

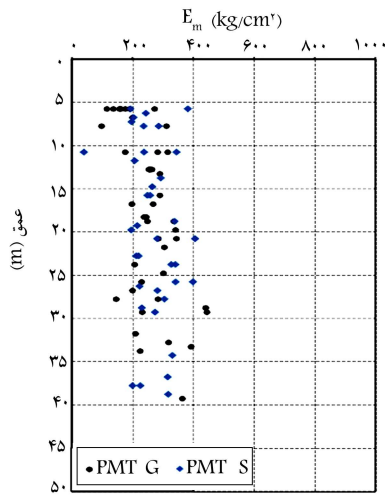
گمانه	عمق (m)	نوع خاک	α	E_m (kg/cm ²)	E'_s (kg/cm ²)	E_s (kg/cm ²)	P_L (kg/cm ²)	E_m/P_L	G (kg/cm ²)	K_s (kg/cm ²)	C_u (kg/cm ²)
P-۴	۵٫۰ - ۳٫۵	GW-GC	۰٫۲۵	۳۲۶	۱۳۰۴	۹۳۹	۵۹٫۵	۵٫۵	۱۲۲	۱۹٫۱	۰٫۸۲
	۲۱٫۰ - ۱۹٫۵	GC	۰٫۲۵	۷۵۱	۳۰۰۴	۲۳۳۹	۶۱٫۳	۱۲٫۳	۲۸۰	۲۳٫۲	۰٫۸۳
P-۶	۵٫۰ - ۳٫۵	GC-GM	۰٫۲۵	۲۵۲	۱۰۰۸	۷۲۵	۵۸٫۳	۴٫۳	۹۵	۱۵٫۴	۰٫۷۸
	۹٫۰ - ۷٫۵	SC-SM	۰٫۳۴	۷۲۳	۲۱۲۶	۱۶۶۰	۵۸٫۳	۱۲٫۴	۲۶۸	۳۲٫۳	۰٫۷۹
	۱۳٫۰ - ۱۱٫۵	SC	۰٫۳۴	۸۴۷	۲۴۹۱	۲۰۶۶	۵۷٫۸	۱۴٫۷	۳۱۵	۳۰٫۹	۰٫۸۹
	۱۷٫۰ - ۱۵٫۵	GC	۰٫۲۵	۸۸۵	۳۵۴۰	۲۹۴۰	۵۸٫۵	۱۵٫۱	۳۲۸	۲۸٫۳	۰٫۸۶
	۲۱٫۰ - ۱۹٫۵	SC	۰٫۳۴	۸۸۳	۲۵۹۷	۲۱۵۴	۵۹٫۰	۱۴٫۹	۳۲۶	۳۱٫۳	۰٫۹۵

جدول ۵. تعدادی از نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در پروژه‌ی زیرگذر آرش.

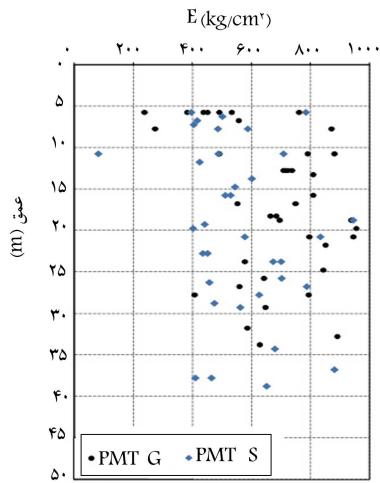
گمانه	عمق (m)	نوع خاک	α	E_m (kg/cm ²)	E'_s (kg/cm ²)	E_s (kg/cm ²)	P_L (kg/cm ²)	E_m/P_L	G (kg/cm ²)	K_s (kg/cm ²)	C_u (kg/cm ²)
BH-A۱	۱۱٫۵ - ۱۰٫۰	GP-GC	۰٫۲۵	۴۵۰	۱۸۰۰	۱۴۹۵	۵۳٫۶	۸٫۴	۱۶۵	۲۳٫۶	۰٫۲۳
	۱۶٫۰ - ۱۴٫۵	SC	۰٫۳۴	۵۵۲	۱۶۲۳	۱۰۹۰	۹۸	۵٫۴	۲۰۵	۳۲٫۳	۰٫۷۳
BH-A۲	۴٫۵ - ۳٫۰	GC	۰٫۲۵	۴۶۰	۱۸۴۰	۱۵۲۵	۳۷٫۰	۱۲٫۴	۱۷۰	۲۷٫۰	۰٫۶۱
	۱۰٫۰ - ۸٫۵	GW-GC	۰٫۲۵	۵۳۶	۲۱۴۵	۱۷۸۰	۵۴٫۳	۹٫۹	۲۰۰	۳۱٫۸	۰٫۱۸
	۳۰٫۵ - ۲۹٫۰	SC	۰٫۳۴	۶۱۶	۱۸۱۱	۱۲۱۵	۵۵٫۳	۱۱٫۱	۲۳۰	۳۶٫۰	۰٫۷۷

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در محیط آزمایشگاه.

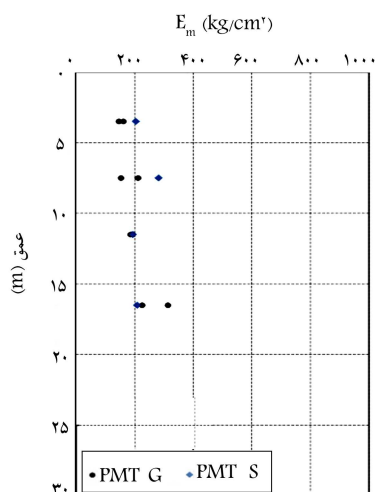
گمانه	عمق (m)	نوع خاک	α	E_m (kg/cm ²)	E'_s (kg/cm ²)	E_s (kg/cm ²)	P_L (kg/cm ²)	E_m/P_L	G (kg/cm ²)	C_u (kg/cm ²)	K_s (kg/cm ²)
G	۴٫۰ - ۳٫۰	GC	۰٫۲۵	۱۶۳	۶۵۲	۴۷۰	۵۵٫۶	۲٫۹	۶۱	۰٫۱۹	۹٫۵
	۸٫۰ - ۷٫۰	GC	۰٫۲۵	۱۵۵	۶۲۰	۴۴۶	۶۵٫۸	۲٫۴	۵۸	۰٫۱۸	۹٫۰
	۱۲٫۰ - ۱۱٫۰	GC	۰٫۲۵	۱۹۵	۷۸۰	۵۶۲	۵۴٫۵	۳٫۶	۷۳	۰٫۲۶	۱۱٫۴
	۱۷٫۰ - ۱۶٫۰	GC	۰٫۲۵	۲۲۷	۹۰۸	۶۵۴	۵۵٫۵	۴٫۱	۸۵	۰٫۲۸	۱۳٫۲
S	۴٫۰ - ۳٫۰	SC	۰٫۳۴	۲۰۵	۶۰۳	۳۷۴	۴۵٫۵	۴٫۵	۷۵	۰٫۴۹	۱۲٫۰
	۸٫۰ - ۷٫۰	SC	۰٫۳۴	۲۸۳	۸۳۲	۵۱۵	۵۴٫۷	۵٫۲	۱۰۵	۰٫۴۲	۱۶٫۶
	۱۲٫۰ - ۱۱٫۰	SC	۰٫۳۴	۱۹۵	۵۷۳	۳۵۵	۵۳٫۷	۳٫۶	۷۲	۰٫۵۶	۱۱٫۴
	۱۷٫۰ - ۱۶٫۰	SC	۰٫۳۴	۲۱۰	۶۱۸	۳۸۳	۵۴٫۰	۳٫۹	۷۸	۰٫۵۵	۱۲٫۳
G	۴٫۰ - ۳٫۰	GC	۰٫۲۵	۱۴۸	۵۹۲	۴۰۵	۵۴٫۲	۲٫۷	۵۵	۰٫۱۷	۸٫۶
	۸٫۰ - ۷٫۰	GC	۰٫۲۵	۲۱۳	۸۵۲	۵۷۹	۶۶٫۹	۳٫۲	۸۰	۰٫۲۸	۱۲٫۵
	۱۲٫۰ - ۱۱٫۰	GC	۰٫۲۵	۱۸۸	۷۵۲	۵۱۱	۶۴٫۸	۲٫۹	۷۰	۰٫۲۳	۱۱٫۰
	۱۷٫۰ - ۱۶٫۰	GC	۰٫۲۵	۳۱۵	۱۲۶۰	۸۵۷	۵۷٫۸	۵٫۵	۱۱۷	۰٫۳۷	۱۸٫۵



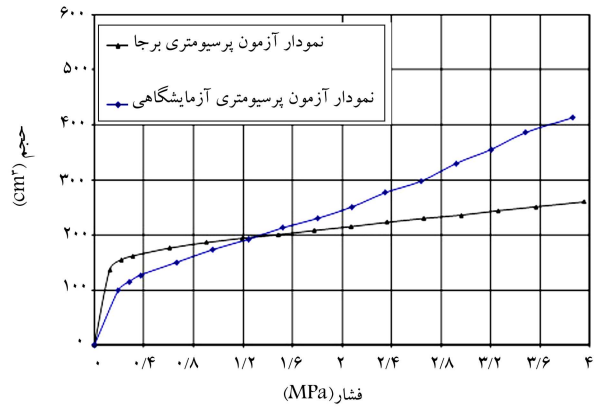
شکل ۱۶. تغییرات مدول پرسیمتری E_m با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.



شکل ۱۷. تغییرات مدول کشسانی (E) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.



شکل ۱۸. تغییرات مدول پرسیمتری با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش در آزمایش‌های پرسیمتری برای عمق ۱۱٫۵ متری.

-- شیب نمودار تنش - کرنش؛

-- مدول پرسیمتری و مدول کشسانی؛

-- فشار حدی؛

-- چسبندگی؛

-- نسبت تاریخچه‌ی تنش؛

-- مدول واکنش بستر.

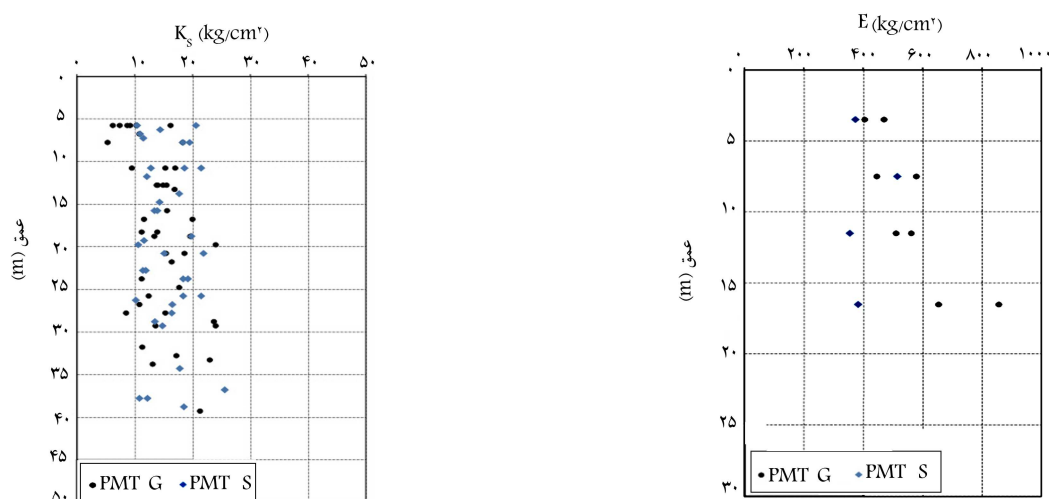
همچنین به منظور بررسی دقت آزمایش‌ها نیز می‌توان تنش‌های بر جای اولیه‌ی آزمون‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. پله‌های بارگذاری، افت‌های حجمی و... شاخص‌های دیگر کنترل نتایج آزمون‌هاست.

۱.۷. بررسی منحنی‌های پرسیمتری

همان‌طور که از نمودارهای شکل‌های ارائه شده مشاهده می‌شود، رفتار آبرفت درشت‌دانه با سیمان‌تاسیون مقاوم‌تر و مطلوب‌تر از خاک‌های بازسازی شده هستند. همچنین شیب نمودارهای بازسازی شده نسبتاً ثابت است، ولی در آزمون‌های برجا پس از شکستن اثر سیمان‌تاسیون شیب ثابت شده است. با مقایسه‌ی نتایج تنش‌های افقی برجا مشاهده می‌شود که میزان تنش‌های افقی آزمون‌های برجا بیشتر است، که این امر به دلیل وجود اثر سیمان‌تاسیون یا سفتی اولیه است. فقط در آزمایش عمق ۷٫۵ متری، که اختلاف زیادی بین تنش‌های افقی دو آزمون مشاهده می‌شود، در سایر آزمایش‌ها این تنش‌ها نزدیک یکدیگر هستند، که نشان‌دهنده‌ی اعمال مناسب تنش همه‌جانبه و همچنین بازسازی مناسب است.

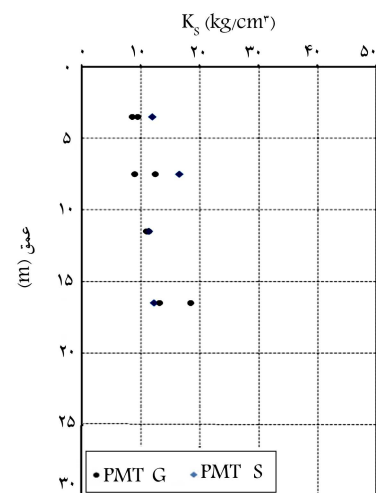
۲.۷. اثر ضریب α

در این بخش به بررسی یکی از نکات ابهام محاسبات تفسیر نتایج پرسیمتری یعنی اعمال ضریب α پرداخته شده است. ضریب α از سوی برخی پژوهشگران در محاسبات مدول کشسانی وارد شده است، همان‌گونه که در بخش ۵ و جدول ۱ به نحوه‌ی استفاده از آن اشاره است. از طرفی برخی پژوهشگران نیز به استفاده از ضریب α اشکال وارد کرده‌اند و به این امر معتقد هستند که اعمال این ضریب سبب غیرواقعی شدن مقادیر مدول کشسانی می‌شود. برای نیل به این مقصود در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹، مقادیر مدول پرسیمتری بدون اعمال ضریب α و مقادیر مدول کشسانی با اعمال ضریب α برای هر دو نوع آزمون ارائه شده‌اند. همان‌گونه



شکل ۱۹. تغییرات مدول کشسانی با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه. به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.

شکل ۲۰. تغییرات مدول واکنش بستر (K_s) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه. به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.



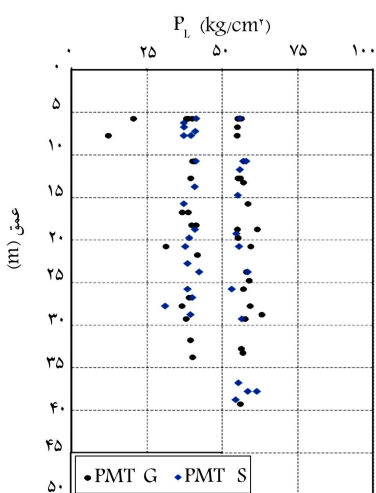
شکل ۲۱. تغییرات مدول واکنش بستر با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه.

که مشاهده می‌شود، تأثیر ضریب α سبب قابل قبول تر شدن مقادیر مدول کشسانی حاصل از آزمایش‌ها شده است. این امر مورد بحث بیشتر پژوهشگران مهندسی ژئوتکنیک است، که آیا اعمال ضریب α با این مقادیر تأثیر منفی در محاسبات دارد یا خیر؟ در اینجا مشاهده می‌شود که نه فقط تأثیر منفی ندارد، بلکه نتایج حاصل را قابل قبول تر می‌کند. بر مبنای شکل‌های ۱۷ و ۱۹ مشاهده می‌شود که اثر عمق در خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های ماسه‌یی است.

با مقایسه‌ی نتایج آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاک‌های بازسازی شده سبب افزایش شیب محدوده‌ی خطی و در نتیجه کاهش مقادیر مدول کشسانی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۳۰٪ مقادیر برجا بوده است.

براساس شکل‌های ۲۰ و ۲۱، این واقعیت بار دیگر خود را نشان می‌دهد که تأثیر مثبت اعمال ضریب α قابل انکار نیست. زیرا محاسبات مدول واکنش بستر براساس نتایج خام یعنی مدول پرسیمتری (E_m) انجام می‌گیرد، مشاهده می‌شود که مانند شکل ۲۰، نتایج نمونه‌های ماسه‌یی بیشتر از نمونه‌های شنی است و این در حالی است که چنانچه با اعمال این ضریب یعنی با استفاده از مدول کشسانی (E) این محاسبات انجام گیرد، نتایج قابل قبول تر خواهد بود.

بنابراین پیشنهاد پژوهشگران این نوشتار این است که محاسبات مدول واکنش بستر از روی نتایج آزمون پرسیمتری براساس مقادیر مدول کشسانی انجام شود.

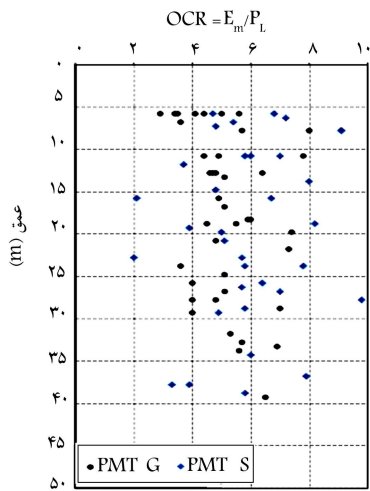


شکل ۲۲. تغییرات فشار حدی (P_L) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.

۳.۷. فشار حدی و ضریب چسبندگی

مقادیر فشار حدی (P_L) و ضریب چسبندگی (C_u) در شکل‌های ۲۲ الی ۲۵ ارائه شده‌اند. روش محاسبه‌ی این مقادیر در بخش ۵ بحث شده است. مقادیر فشار حدی ارائه شده در جدول ۴ از روش ارائه شده در بخش ۵ به دست آمده‌اند. براساس شکل ۲۲ و همچنین مبنای تئوری این روش، تغییرات چندانی در میزان فشار حدی بر حسب عمق مشاهده نمی‌شود. تأثیر جنس خاک بسیار بیشتر است.

همچنین براساس شکل ۲۴ و مبنای تئوری محاسبات ضریب چسبندگی مشخص شده است که نمونه‌های با درصد ریزدانه‌ی بیشتر، مقادیر بزرگ‌تری از این ضریب را دارند. بنابراین نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی موفقیت آزمون پرسیمتری در تعیین ضریب چسبندگی زهکشی نشده‌ی خاک‌های آبرفتی است. با مقایسه‌ی مقادیر



شکل ۲۶. تغییرات نسبت تاریخچه‌ی تنش $(OCR = E_m/P_L)$ با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.

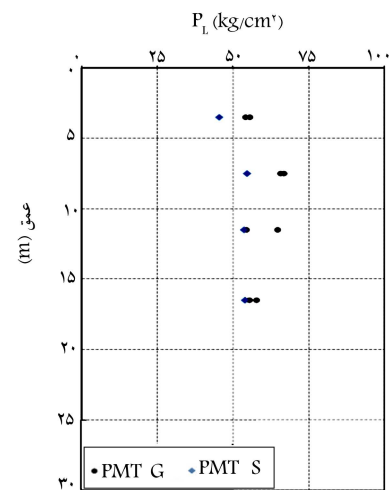
ضریب چسبندگی حاصل از آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاک‌های بازسازی شده سبب کاهش مقادیر ضریب چسبندگی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰٪ مقادیر برجا بوده است.

تاریخچه‌ی تنش خاک همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است تا بررسی دقیق‌تری نسبت به رفتار تنش - کرنش خاک‌ها داشته باشند. بر این اساس مقادیر ضریب تاریخچه‌ی تنش $(OCR = E_m/P_L)$ از روی نتایج آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در این پژوهش محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از شکل ۲۶ و ۲۷ نشان می‌دهد که پراکندگی این مقادیر بر روی خاک‌های آبرفتی ماسه‌یی رس‌دار بسیار بیشتر از سایر نمونه‌های مورد آزمایش است. این امر با واقعیت به دست آمده از نتایج آزمون‌های تحکیم انجام شده در این پروژه مطابقت دارد. بنابراین بار دیگر این نتایج حاکی از موفقیت آزمون پرسیمتری در بررسی شرایط پیش‌تحکیمی خاک‌های آبرفتی است. در این دو پارامتر برخلاف محاسبات مدول واکنش بستر (K_s) به نظر می‌رسد استفاده از داده‌های خام مطابق نشریه‌های موجود قابل قبول باشد.

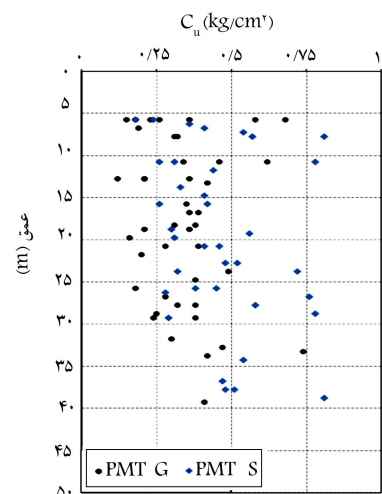
با مقایسه‌ی مقادیر نسبت تاریخچه‌ی تنش حاصل از آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاک‌های بازسازی شده و خطاهای موجود در تأمین شرایط بازسازی و همچنین اعمال فشار همه‌جانبه، سبب کاهش مقادیر نسبت تاریخچه‌ی تنش شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰٪ مقادیر برجا بوده است. البته شایان ذکر است که کاهش مقادیر مدول پرسیمتری به خودی خود سبب کاهش این مقادیر می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری

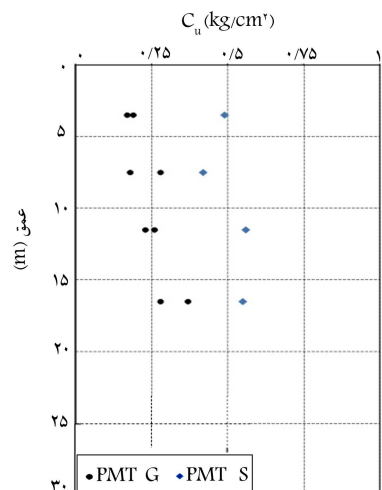
در این نوشتار پارامترهای تأثیرگذار در رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه به کمک انجام آزمایش پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاه مورد بررسی و مدل‌سازی فیزیکی قرار گرفته است. به منظور نیل به این هدف، طراحی و



شکل ۲۳. تغییرات فشار حدی (P_L) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه.



شکل ۲۴. تغییرات ضریب چسبندگی (C_u) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری به ترتیب برای آبرفت‌های ماسه‌یی (S) و شنی (G) در شرایط برجا.



شکل ۲۵. تغییرات ضریب چسبندگی (C_u) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه.

آزمون پرسیمتری و چگونگی استخراج هر یک از پارامترهای ذکر شده ارائه شده است.

ضریب α از سوی برخی پژوهشگران در محاسبات مدول کشسانی وارد شده است، همان‌گونه که در بخش ۵ و جدول ۱ به نحوه استفاده از آن اشاره است. از طرفی برخی پژوهشگران نیز به استفاده از این ضریب اشکال وارد کرده‌اند و به این امر معتقدند که اعمال این ضریب سبب غیر واقعی شدن مقادیر مدول کشسانی می‌شود. برای نیل به این مقصود در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹ مقادیر مدول پرسیمتری بدون اعمال ضریب α و مقادیر مدول کشسانی با اعمال ضریب α برای هر دو نوع آزمون ارائه شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تأثیر ضریب α سبب قابل قبول تر شدن مقادیر مدول کشسانی حاصل از آزمایش‌ها شده است. این امر مورد بحث بیشتر پژوهشگران مهندسی ژئوتکنیک بوده است که آیا اعمال ضریب α با این مقادیر تأثیر منفی در محاسبات دارد یا خیر؟ در اینجا مشاهده می‌شود که نه فقط تأثیر منفی ندارد، بلکه نتایج حاصل را قابل قبول‌تر می‌کند. بر مبنای شکل‌های ۱۷ و ۱۹ مشاهده می‌شود که اثر عمق در خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های ماسه‌یی است.

بر اساس نتایج این پژوهش مشاهده می‌شود که اعمال ضریب α نه فقط تأثیر منفی ندارد، بلکه نتایج حاصل در محاسبات مدول کشسانی و مدول واکنش بستر را قابل قبول‌تر می‌کند.

بر اساس شکل‌های ۱۶ و ۱۹ این واقعیت بار دیگر خود را نشان می‌دهد که تأثیر مثبت اعمال ضریب α قابل انکار نیست. بنابراین پیشنهاد پژوهشگران این نوشتار این است که محاسبات مدول واکنش بستر از روی نتایج آزمون پرسیمتری بر اساس مقادیر مدول کشسانی انجام شود.

با مقایسه نتایج آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نبود اثر سیماناسیون در خاک‌های بازسازی شده سبب افزایش شیب محدوده‌ی خطی و در نتیجه کاهش مقادیر مدول کشسانی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۳۰٪ مقادیر برجا بوده است.

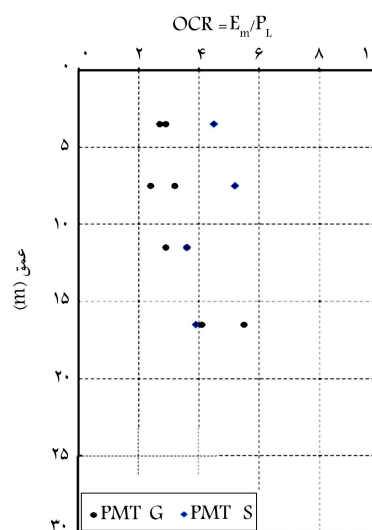
در نهایت در این پژوهش مشاهده شده است که آزمون پرسیمتری، موفق‌ترین آزمایش در تعیین پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آبرفت درشت‌دانه است.

با مقایسه مقادیر ضریب چسبندگی حاصل از آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود که نبود اثر سیماناسیون در خاک‌های بازسازی شده سبب کاهش مقادیر ضریب چسبندگی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰٪ مقادیر برجا بوده است.

با مقایسه مقادیر نسبت تاریخچه تنش حاصل از آزمون‌های پرسیمتری در محیط برجا و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نبود اثر سیماناسیون در خاک‌های بازسازی شده و خطاهای موجود در تأمین شرایط بازسازی و همچنین اعمال فشار همه‌جانبه سبب کاهش مقادیر نسبت تاریخچه تنش شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰٪ مقادیر برجا بوده است. البته شایان ذکر است که کاهش مقادیر مدول پرسیمتری به خودی خود سبب کاهش این مقادیر می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان نوشتار بر خود لازم می‌دانند از مسئولان محترم شرکت پژوهش عمران راهوار، که مساعدت بسیار خوبی در تهیه داده‌های مورد نیاز داشته‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارند.



شکل ۲۷. تغییرات نسبت تاریخچه تنش ($OCR = E_m/P_L$) با عمق در آزمایش‌های پرسیمتری انجام شده در آزمایشگاه.

ساخت دستگاه چمبر آزمایشگاهی جهت انجام آزمون‌های پرسیمتری در شرایط بازسازی شده در دستور کار قرار گرفته است. بررسی منحنی‌های پرسیمتری حاصل نشان داده است که نتایج آزمون‌های انجام شده قابل اعتماد هستند. بر اساس این نتایج می‌توان مقایسه‌ی جامعی در اثر سیماناسیون بر روی رفتار تنش - کرنش آبرفت درشت‌دانه انجام داد. بررسی این اثر از چند جنبه قابل مشاهده است:

-- تنش افقی برجا؛

-- محدوده‌ی شبه‌خطی؛

-- شیب نمودار تنش - کرنش؛

-- مدول پرسیمتری و مدول کشسانی؛

-- فشار حدی؛

-- چسبندگی؛

-- نسبت تاریخچه تنش؛

-- مدول واکنش بستر.

رفتار آبرفت درشت‌دانه با سیماناسیون مقاوم‌تر و مطلوب‌تر از خاک‌های بازسازی شده هستند. همچنین شیب نمودارهای بازسازی شده نسبتاً ثابت است، ولی در آزمون‌های برجا پس از شکستن اثر سیماناسیون شیب ثابت شده است. با مقایسه نتایج تنش‌های افقی برجا مشاهده می‌شود که میزان تنش‌های افقی آزمون‌های برجا بیشتر است، که این امر به دلیل وجود اثر سیماناسیون یا سفتی اولیه است.

سپس به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در رفتار آبرفت درشت‌دانه پرداخته شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی مذکور شامل پارامترهای تغییرشکل‌ی مانند مدول تغییرشکل (E) و مدول واکنش بستر (K_s)، پارامترهای مقاومت برشی از جمله ضریب چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) و پارامترهای خاصی از قبیل فشار حدی (P_L) و نسبت بیش‌تحکیمی (OCR) هستند، که در رفتار آبرفت درشت‌دانه تأثیرگذار هستند. در این نوشتار توضیحاتی جهت تفسیر نتایج

پانوشتها

1. thick hollow cylinder
2. probe
3. slotted tube

منابع (References)

1. *Pressuremeter Test*, Instruction for Test and Application for Foundation Design, No. 223, Iran Management and Planning Org. (2002).
2. Haeri, M., Hamidi, A., Asghari, E., Hosseini, S.M. and Toll, D.G. "The mechanical behavior of a gravely sand cemented with different cement type", *57th Canadian Geotechnical Conference D. G.*
3. Bellotti, R., Bizzi, G. and Ghionna, V.N. "Design, construction and use of calibration chamber", *Proc. 2nd European Symp. on Penetration Testing*, Amsterdam, **2**, pp. 439-446 (1982).
4. Huang, A.B., Holtz, R.A. and Chameau, J.L. "Pressuremeter holding test in a calibration chamber", *Proc. 3rd Int. Symp. On the Pressuremeter and Its Marine Applications*, Oxford Univ., pp. 253-262 (1990).
5. Manassero, B. "Calibration chamber correlations for horizontal in situ stress assessments using self-boring pressuremeter and cone penetration test", *Proc. 1st Int. Symp. on Calibration Chamber Testing*, Postdam, pp. 237-248 (1991).
6. Ajalloeian, R. and Yu, H.S. "Chamber studies of the effects of pressuremeter geometry on test results in sand", *Geotechnique*, **48**(5), pp. 621-636 (October 1998).
7. Muraleetharan, K.K., Yang, Y., Salehipour, S.A. and Dhavala, M.D., *Cavity Expansion Theories for Unsaturated Soil*, Technical Report, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman (1998).
8. Dupla, J.C. and Canou, J. "Cyclic pressuremeter loading and liquefaction properties of sands", *Soil and Foundation*, *JSCE*, **75**, pp. 17-31 (2011).
9. Clarke, B.G., *Pressuremeters in Geotechnical Design*, Blackie Academic & professional Pub., 364 p. (1995).
10. Asghari, E. and Yasrobi, S.S. "Investigation of deformation parameters of marl with pressuremeter test", (2006).