رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هشتم، شماره چهارم ۱۴۰۳، صفحه: ۱۵-۲۶

مدلسازی سیمانی شدن (Cementation) خاکهای آبرفتی درشت دانه به کمک دستگاه چمبر و آزمون پرسیومتری

محمد امامی کورنده [۱*]، سید عظیم حسینی [۲]، علیرضا صبوری املشی [۳]

[۱*] استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(Emamiacademic@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱)

چکیده

آبرفت درشت دانه در مناطق شهری بیشترین فراوانی را دارد که این امر به علت فرآیند رسوبگذاری در این مناطق است. کلان شهری مانند تهران نیز در بیشتر مناطق خود این آبرفت را در لایه‌های زیرسطحی دارد. پروژه‌های مختلفی هر ساله در این کلانشهر در زیر سطح زمین اجرا می‌شوند. بنابراین رفتار این نوع مصالح اهمیت بسیاری دارد و در پروژه‌هایی مانند حفاظت از دیواره‌های گودبرداری و تونلسازی از اهمیت بسیار بالاتری برخوردار است. این مقاله سعی دارد به مدلسازی اثر سیمانی شدن در رفتار آبرفت درشت دانه تهران بر اساس نتایج آزمونهای برجا و آزمایشگاهی بپردازد. برای این منظور دستگاه چمبر آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش پرسیومتری در محیط آزمایشگاه ساخته شده است. آزمایش پرسیومتری به این دلیل استفاده شده است که بیشترین پارامترهای موثر در رفتار آبرفت درشت‌دانه به صورت مستقیم و غیرمستقیم از نتایج این آزمون قابل دسترس هستند. پروژه تونل صدر- نیایش تهران برای انجام آزمونهای برجی پرسیومتری استفاده شده است. با مقایسه مقادیر ضریب چسبندگی حاصل از آزمونهای پرسیومتری در محیط برجا و آزمایشگاهی، مشاهده می¬شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاکهای بازسازی شده سبب کاهش مقادیر ضریب چسبندگی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰ درصد مقادیر برجا بوده است.

کلمات کلیدی

آبرفت درشت دانه تهران، اثر سیمانی شدن، چمبر، پرسیومتری.

Modeling Cementation of Coarse-Grained Alluvial Soils Using Chamber Apparatus and Pressuremeter Test

Mohammad EmamiKorandeh [1*], Seyed Azim Hosseini, [2], Alireza Sabouri Amlashi [3]

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

[2] Associate Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[3] Master's degree student, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Emamiacademic@gmail.com)

(Date of received: 21/11/2024, Date of accepted: 10/03/2025)

ABSTRACT

The Coarse-grained alluvium is most common in urban areas, which is due to the sedimentation process in these areas. A metropolis like Tehran also has this alluvium in subsurface layers in most of its areas. Various projects are implemented in this metropolis every year below the ground surface. Therefore, the behavior of this type of material is very important and is of much higher importance in projects such as protecting excavation walls and tunneling. This article attempts to model the effect of cementation on the behavior of coarse-grained alluvium in Tehran based on the results of in-situ and laboratory tests. For this purpose, a laboratory chamber device has been built to perform pressuremeter tests in a laboratory environment. Pressuremeter tests have been used because most of the parameters affecting the behavior of coarse-grained alluvium are directly and indirectly accessible from the results of this test. The Sadr-Niyaish Tunnel Project in Tehran has been used to perform pressuremeter tower tests. By comparing the adhesion coefficient values obtained from in situ and laboratory Pressuremeter tests, it is observed that the lack of cementation effect in the reconstructed soils has caused a decrease in the adhesion coefficient values. This decrease has been up to 50% of the in-situ values at some depths.

Keywords:

Tehran Coarse Alluvium, Cementation Effect, Chamber, Pressuremeter.

۱- مقدمه

کلانشهر تهران همواره دارای پروژه‌های عمرانی بزرگی بوده که بخش مهمی از آن به علت مشکلات ترافیکی در زیرزمین ظراحی شده‌اند. بر اساس نقشه زمین‌شناسی تهران بخش مهمی از لایه‌های زیرسطحی در این شهر بر روی آبرفت درشت دانه بنا شده است. دلیل این امر که بخش مهمی عنوان شده است اینست که قالب لایه‌های زیرسطحی بخش شمالی شهر تهران از این جنس خاک دارند که از لحاظ اقتصادی اهمیت بیشتری داشته و اکثر پروژه‌های بزرگ ساخت و ساز و شهر در این مناطق تعریف می‌گردند. بنابراین مشخص است که رفتار آبرفت درشت دانه در این شهر چقدر اهمیت دارد. محققین مختلفی بر روی رفتار آبرفت درشت‌دانه تهران پژوهش‌های خود را انجام داده‌اند که نشان می‌دهد این موضوع همواره دغده مهندسین ژئوتکنیک در ایران بوده است. همچنین بحث سیمانی شدن در منتشرات بین‌المللی نیز جایگاه مهمی در مهندسی ژئوتکنیک دارد. یکی از اولین تحقیقات منتشر شده در این زمینه در سال ۱۳۸۷ توسط فلاحی و همکاران به منظور بررسی مدلهای رفتاری مختلف در مدلسازی رفتار سیمانی شدن آبرفت درشت دانه تهران انجام شده است [۱]. در این تحقیق مدلهای مختلف رفتاری برای مدلسازی رفتار آبرفت درشت‌دانه تهران مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت مدل رفتاری Cam-Clay ساختاری (SCC) به عنوان گزینه مناسبی در این زمینه معرفی گردید. این مهم به علت طبقاتی بودن این مدل بوده که قابلیت آنرا در خاکهای سیمانی و غیر سیمانی ارتقا داده است. امامی و همکاران نیز در پژوهش خود در سال ۱۳۹۵ به بررسی پارامترهای رفتاری آبرفت درشت دانه تهران به کمک آزمایش پرسیومتری پرداختند [۲]. این مطالعه به بررسی پارامترهای قابل حصول از آزمایش پرسیومتری برای مدلسازی رفتار آبرفت درشت دانه تهران اختصاص دارد. پارامترهایی مانند ضریب چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، مدول تغییر شکل (E) و ضریب واکنش بستر (Ks) در این تحقیق برای آبرفت درشت‌دانه تهران بر اساس نتایج آزمونهای پرسیومتری برجا و آزمایشگاهی تعیین شده‌اند. معرفی دو اصلاح موثر برای بهبود پیش بینی رفتار دینامیکی خاک های درشت‌دانه در مدل رفتاری پاستور- زینکوویچ تحقیق دیگری است که در سال ۱۳۹۸ توسط ایرجی انجام شده است [۳]. در این پژوهش دو اصلاح موثر برای بهبود پیش بینی رفتار دینامیکی خاک‌های درشت‌دانه توسط مدل رفتاری خمیری تعمیم یافته (Generalized plasticity) پاستور- زینکوویچ (Pastor-Sienkiewicz, PZ) معرفی شده است. اصلاح اول برای در نظر گرفتن پدیده اثر سست شوندگی در بارگذاری متناوب خاک های درشت‌دانه متراکم و اصلاح دوم برای بهبود پیش بینی پدیده رچتینگ (Ratcheting) یعنی کرنش های خمیری پیش رونده در خاک های درشت‌دانه تحت بارگذاری متناوب اعمال شده است.

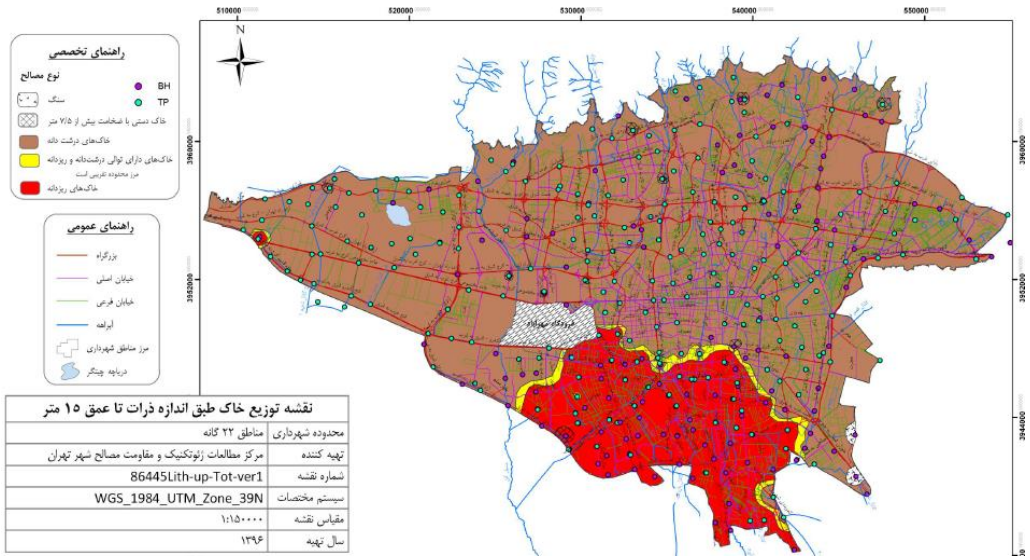
بررسی اثر سیمانی شدن در منتشرات بین‌المللی نیز یکی از موضوعات مورد علاقه محققین مهندسی ژئوتکنیک بوده است. تاریخچه بررسی این اثر به تحقیق ژانگ و کیو در سال ۲۰۰۵ در زمینه بررسی ساختاری اثر سیمانی شدن در خاکهای ماسه‌ای بر می‌گردد. این پژوهش بر اساس تجزیه و تحلیل آماری و بررسی عکسهای میکروسکوپی انجام شده است که بر این اساس نتیجه گرفته شد که هر چه ضریب تجمع در خاک ماسه‌ای بالاتر باشد آنگاه درجه سیمانی شدن این خاک بیشتر می‌گردد. این مطالعه همچنین بیان کرد که بررسی ترکیب سیمان و مکانیسمهای سیمانی شدن خاک ماسه‌ای می‌تواند دید بهتری نسبت به رفتار این نوع خاک ارایه دهد. شبیه سازی عددی آزمون سه محوری بر روی خاک‌های درشت‌دانه سیمانی شده توسط ژو و همکاران در سالا ۲۰۱۱ انجام شده است. در این مقاله از روش المان گسسته (DEM) برای شبیه‌سازی آزمایش‌های سه محوری بار یکنواخت زه‌کشی شده خاک‌های درشت دانه و خاک‌های درشت دانه سیمانی استفاده شده است، پارامترهای میکروسکوپی مدل‌های عددی بر اساس آزمایش‌ها کالیبره شدند. ویژگی‌های خاک‌های درشت دانه سیمانی و مکانیسم میکروسکوپی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاک های درشت دانه سیمانی شده دارای مدول و استحکام بالاتری نسبت به درشت دانه با افزودن ۳ درصد سیمان در نمونه ها بوده و پس از رسیدن تنش به حداکثر مقدار، نرم شدن کرنش قابل توجهی به نظر می رسد. تغییر شکل ذرات خاک، اصطکاک بین ذرات خاک و ترک پیوند سیمان از عوامل داخلی هستند. ماهاویش و همکاران در سال ۲۰۱۸ در تحقیق خود به بررسی تأثیر توزیع اندازه ذرات بر سیمانی شدن ساختار خاک‌های درشت‌دانه پرداختند. آزمون تک محوری و پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری در این تحقیق محور اصلی بررسی بوده است. توزیع اندازه دانه‌ها در فرآیند سیمانی‌شدن و در نهایت افزایش یا کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری در تحقیق حاضر بررسی شده است. خاکهای درشت‌دانه به نسبت وزنی و توزیع دانه‌های مختلف در پنج حالت مورد آزمایش قرار گرفتند. حداکثر UCS تقریباً ۵۷۵ کیلو پاسکال با توزیع اندازه ذرات حاوی ۷۵٪ سنگدانه درشت و ۲۵٪ سنگدانه ریز به دست آمد. همچنین برای حداقل مقاومت فشاری تک محوری نیز مزیتهای ذکر شده است. در این مطالعه همچنین مشخص شد که با ترکیب توزیع اندازه دانه‌های مناسب می‌توان فرآیند سیمانی شدن بهتری نیز به دست آورد.

سانگاتارشا و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تغییر سختی خاک درشت دانه تهران با عمق و کرنش و همچنین اثر سیمانی‌شدن در رفتار این خاک پرداختند. اصل مهم در این تحقیق به بررسی سبک تغییر سختی در این نوع خاک است. برای تعیین شکل تغییر سختی تهران با عمق و کرنش، آزمایشات فشارسنج و سرعت موج برشی در این تحقیق انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سختی خاک تهران در کرنش‌های کوچک به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سختی اکثر خاک‌های شنی گزارش‌شده در متون فنی است. یک روند منحصر به فرد در افزایش سختی خاک با عمق یا فشار محدود در چند نقطه از تهران مشاهده شد. این امر در تحقیق مولفین حاضر نیز مشاهده شده است و با توجه به وجود اثر سیمانی‌شدن دور از ذهن نیست. با بررسی سختی سایر خاکهای درشت دانه، مشاهده شد که رفتار خاکهای شنی با درصد شن بالا، نسبت به خاکهای درشت دانه یکپارچه، خاکهای درشت دانه پیش تنیده و خاکهای سیمانی مشابه خاک تهران است. رفتار خاص خاک تهران و عدم تشابه آن با سایر خاک های درشت دانه به سیمان شدن و تحکیم بیش از حد آن مرتبط است.

ساختار مقاله حاضر شامل ۶ بخش تنظیم شده است. در بخش اول مقدمه و مروری بر ادبیات فنی موضوع اصلی تحقیق ذکر شده است. بخش دوم به معرفی رفتار آبرفت درشت‌دانه تهران و اثر سیمانی‌شدن و نحوه تحلیل و بررسی آن پرداخته شده است. بخش سوم به برنامه آزمایشات تحقیق حاضر و انواع آزمایشات آن می‌پردازد. بخش چهارم به بررسی و مقایسه نتایج برجا و آزمایشگاهی تحقیق حاضر خواهد پرداخت. در نهایت بخش پنجم نیز به جمع‌بندی و نتیجه گیری خواهد پرداخت.

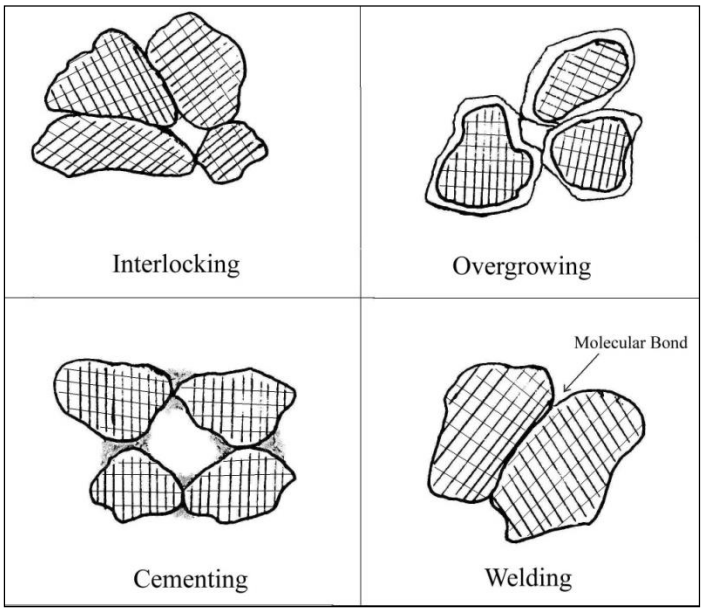
۲- آبرفت درشت دانه تهران و سیمانی شدن

بر اساس نقشه پهنه‌بندی ژئوتکنیکی تهران که توسط مرکز مطالعات ژئوتکنیک سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران گزارش شده است، بیش از ۸۰ درصد بافت لایه‌های زیرسطحی تهران از جنس آبرفت درشدانه تشکیل شده است. شکل ۱ این پهنه‌بندی را در اعماق ۰ تا ۱۵ متر از سطح زمین نشان می‌دهد. شایان ذکر است در نقشه اعماق ۱۵ تا ۳۰ متر نیز شرایط مشابه ای حاکم بوده و قالب بافت خاکی لایه‌های زیرسطحی از جنس آبرفت درشت‌دانه است. اهمیت رفتار این آبرفت از این جهت بیشتر می‌شود که به علت ارزش بسیار بالای زمین در شهر تهران، فعالیتهای زیرزمینی و پروژه‌های در این شرایط بسیار بیشتر از شهرهای دیگر ایران در آن تعریف می‌گردد.



شکل ۱: تصویری از نقشه پهنه‌بندی لایه‌های زیرسطحی تهران (عمق ۰ تا ۱۵ متر)

در دهه‌های اخیر مطالعات مختلفی بر روی خاکهای درشت‌دانه سیمانی شده انجام شده است. سیمانی شدن که یکی از مهمترین عوامل ایجاد ساختار در خاک به شمار می‌رود هم در خاکهای ریز دانه و هم در خاکهای درشت دانه بررسی شده است. مرور مطالعات و مقالات موجود درباره سیمانی شدن، نشان می‌دهد که سیمانی شدن در خاکهای درشت دانه بیش از خاکهای ریز دانه مورد توجه بوده است. شاخه‌های مختلف مهندسی ژئوتکنیک، رفتار آبرفتهای درشت‌دانه را مورد توجه و مطالعه قرار داده‌اند. به طور مثال در ظرفیت باربری پی و شمع، گودبرداری و دیوارهای حایل 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 تأثرگذار به خوبی احساس می‌گردد. خاکهای درشت دانه با گذشت زمان و در اثر نهشته شدن کربناتها، هیدروکسیدها و مواد آلی، عوامل محیطی نظیر انحلال و رسوب بعضی مواد در نقاط تماس دانه‌ها، جوش خوردگی دانه‌ها در اثر فشار زیاد، تبلور مجدد برخی کانیها در اثر هوازدگی و وجود لایه آب جذب شده در اطراف دانه‌ها، ساختار پیدا کرده و بین ذرات پیوندهائی بوجود می‌آید(لروئیل و ووان،۱۹۹۰). به عقیده بارتون(۱۹۹۳) ایجاد پیوند بین ذرات خاک درشت دانه، مقدمه سنگ‌زائی می‌باشد که در نهایت موجب تبدیل خاک درشت دانه به ماسه سنگ یا کنگلومرا می‌شود. مهمترین عامل ظهور چسبندگی در خاکهای درشت دانه، سیمانی شدن می‌باشد. گرچه در خاکهای نیمه اشباع نیز چسبندگی ظاهری ضعیفی در اثر کشش سطحی بین ذرات دیده می‌شود که ممکن است در خاکهای درشت دانه حاوی مواد ریز دانه، قابل توجه باشد. در سیمانی شدن خاک، بافت نقش اساسی بازی می‌کند.



شکل ۲: عوامل اصلی بوجود آورنده چسبندگی در خاکهای درشت دانه (بارتون ۱۹۹۳).

روشهای مختلفی برای مدلسازی رفتار آبرفت دزشت‌دانه دارای اثر سیمانی‌شدن استفاده شده است. این روشها شامل مدلسازی فیزیکی (Ismael et. al. 2003) و روشهای عددی معمول مهندسی ژئوتکنیک (فلاحی و همکاران ۲۰۰۸) بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نوآوری تحقیق حاضر در استفاده از روش ترکیبی جهت بررسی رفتار این پدیده است. روش ترکیبی شامل مدلسازی فیزیکی با کمک دستگاه چمبر و آزمون پرسیومتری برجا و آزمایشگاهی و همچنین استفاده از محاسبات نرم و کاربرد روش یادگیری عمیق در این مدلسازی است.

۳- برنامه آزمایش ها

محققین این تحقیق سعی داشتند که بر اساس داده‌های واقعی به کاربرد روش یادگیری عمیق بپردازند. بنابراین طیف وسیعی از آزمونهای مهندسی ژئوتکنیک در پروژه‌های زیرزمینی کلان‌شهر تهران توسط محققین انجام شده است. تعداد زیادی از این آزمایشات توسط خود محققین انجام شده است و تعدادی نیز با نظارت محققین انجام شده است. بنابراین بر صحت داده‌های آزمایشگاهی در این مقاله تردیدی وجود ندارد. جهت بررسی اثر سیمانی‌شدن از آزمایش پرسیومتری استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از این آزمون به این علت است که از نتایج و تفسیر این آزمایش بیشترین پارامترهای رفتاری خاک را می‌توان استخراج کرد. همچنین جهت مقایسه دو حالت وجود و عدم وجود شرایط سیمانی‌شدن از دستگاه چمبر استفاده شده است. با مدلسازی شرایط برجا در محیط آزمایشگاهی آزمون پرسیومتری در خاک بازسازی شده انجام شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۳- ۱- آزمون پرسیومتری

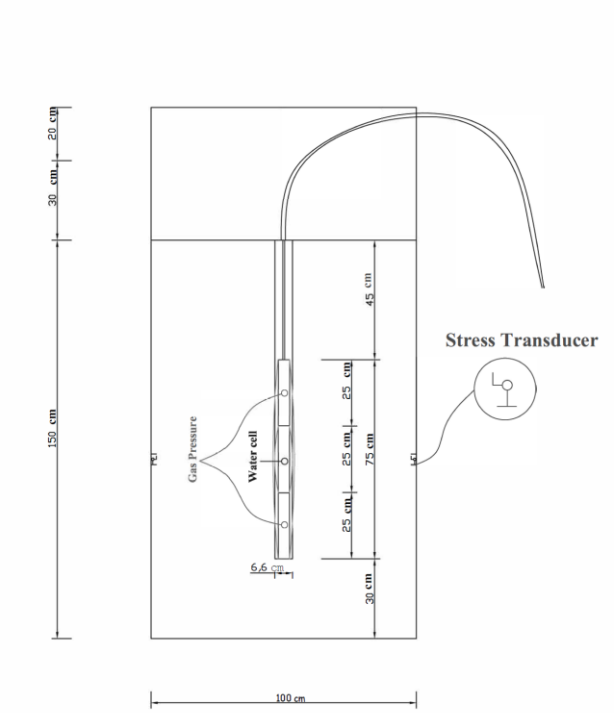
آزمایشهای برجا، نقش بسیار مهمی در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک دارند. آزمایش پرسیومتری نیز یکی از مهم‌ترین آزمایشهای برجای مهندسی ژئوتکنیک است که واقعی‌ترین تصور را نسبت به رفتار تغییرشکلی خاکها نسبت به سایر آزمایشها، نتیجه می‌دهد. لوئیس منارد در سال ۱۹۵۵ دستگاه پرسیومتر را طراحی نمود و این نام را برای آن برگزید. بگلن و همکارانش از پرسیومتر به عنوان ابزاری که فشار هیدرولیک را از طریق غشایی انعطاف‌پذیر به دیواره‌ی گمانه اعمال می‌کند نام می‌برند. برخی پرسیومتر را ابزاری استوانه‌ای شکل معرفی می‌کنند 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 به عنوان تعریف بین‌المللی پرسیومتر شناخته شد. کلارک نیز تعریف منسجم زیر را برای پرسیومتر ارائه می نماید:«پرسیومتر سوندی استوانه‌ای شکل و دارای غشایی انعطاف‌پذیر و منبسط شونده است که برای اعمال فشار یکنواخت به دیواره‌ی گمانه طراحی شده است.» به‌هرحال ایده‌ی اصلی آزمایش پرسیومتری عبارت است از انبساط حفره‌ای استوانه‌ای درون گمانه تا به دیواره‌ی گمانه‌ی حفر شده فشار وارد شود و دیواره را به صورت شعاعی منبسط کند تا به این ترتیب رابطه‌ی بین فشار وارده و تغییر شکل حاصله به‌دست آید. در آزمایش پرسیومتری، ابتدا سوند پرسیومتر در داخل زمین و در عمق مورد نظر قرار گرفته و سپس توسط فشار گاز، آب یا روغن منبسط می‌گردد. منحنی فشار–جابجایی(حجم) و سپس منحنی تنش–کرنش ترسیم می‌شود و متغیرهای مهندسی خاک محصول ثانویه‌ی این منحنی‌ها هستند.

پارامترهای ژئوتکنیکی آبرفت درشت دانه در مسایل مختلف مهندسی ژئوتکنیک همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است. این پارامترهای ژئوتکنیکی شامل پارامترهای تغییرشکلی مانند مدول تغییر شکل (E) و مدول واکنش بستر (Ks)، پارامترهای مقاومت برشی از جمله ضریب چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و پارامترهای خاصی از قبیل فشار حدی (PL) و نسبت بیش تحکیمی (OCR) می–باشند که بر روی رفتار آبرفت درشت¬دانه تأثیرگذار هستند. تمامی این پارامترها را می توان از نتایج آزمونهای پرسیومتری استخراج کرد

۳- ۲- دستگاه چمبر آزمایشگاهی(محفظه آزمایشگاهی)

محققین مختلف جهت شبیه سازی شرایط برجا در محیط آزمایشگاه، از محفظه ای آزمایشگاهی به اصطلاح چمبر استفاده می کنند که در فصل سوم تاریخچه این دستگاه ارایه شده است. این محفظه ها بسته به شرایط تحقیق و نوع مدلسازی می تواند از جنس مصالح مختلف از قبیل چوب، پلاستیک، فولاد، بتن و ... ساخته شوند. در این تحقیق با توجه به مدلسازی شرایط برجای آبرفت درشت دانه به همراه سیمانتاسیون و تنش برجای مورد نظر از فولاد جهت ساخت دستگاه چمبر استفاده شده است. شکل (۳) شمایی از ساخت دستگاه چمبر را نشان می دهد. بر اساس منتشرات ارایه شده در بخش مقدمه و همچنین تحقیقات انجام شده در زمینه اثر ابعاد پرسیومتری بر روی نتایج آزمونهای انجام شده در داخل این دستگاه و با توجه به ابعاد دستگاه مورد استفاده در این تحقیق ضریب مقیاس برابر واحد می باشد. چمبر مورد استفاده در این تحقیق قطری برابر ۱ متر و ارتفاعی معادل ۲ متر دارد. این ابعاد بر اساس سوند پرسیومتری و به کمک محاسبات کنترل اثر صلبیت جداره تعیین شده اند. با توجه به ضریب قطر محفظه و قطر کاوشگر (سوند) پرسیومتری (۶۰ میلی متر) که برابر ۱۸ می باشد این ضریب در محدوده ۱۷ تا ۲۲ قابل قبول است (امامی ۲۰۱۴).

برای بررسی وضعیت توزیع تنش و کرنش در فضای اطراف سوند پرسیومتر و کنترل اثر صلبیت فولاد بر روی رفتار خاک داخل چمبر از گیج¬های تنش¬سنج استفاده شده است. همچنین از معادلات تجربی نیز مانند کرشهوف و تیموشنکو و گودیر نیز ابعاد دستگاه کنترل شده تا از همه لحاظ اطمینان حاصل گردد که صلبیت دیواره بر روی رفتار خاک تأثیر زیادی ندارد. در این معادلات فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود: سوند پرسیومتر بدون هیچگونه دستخوردگی جدار گمانه در داخل خاک قرار می‌گیرد. زمین اطراف سوند همگن و همسانگرد است. سوند بصورت قائم در داخل حفره قرار دارد. نسبت طول به قطر سوند به حد کافی بزرگ است به نحوی که می‌توان آنرا بصورت حفره بی نهایت طویل در نظر گرفت.



شکل ۳: تصویری از نقشه ساخت دستگاه چمبر آزمایشگاهی.

بررسی اثر صلبیت جداره با محاسبات کامل به روش تقارن محوری و روابط هوک و مارلاتان (۲۰۰۳) انجام شده و بر اساس این محاسبات ابعاد شکل (۳) ارایه شده است. شرح این محاسبات در رساله دکتر امامی (۲۰۱۴) قابل مشاهده است. بر اساس این روابط و همچنین بررسی و مقایسه صحت روابط در محیط الاستیک و الاستوپلاستیک حاصل و با توجه به ۱۸ برابر بودن قطر چمبر نسبت به قطر سوند پرسیومتری اثر صلبیت دیواره‌های فولادی بر روی رفتار تنش- کرنش خاک به حداقل رسیده است. با این وجود با استفاده از گیجهای تنش‌سنج که در دیواره چمبر تعبیه شده میزان تنش افقی وارده بررسی شده است. پیش از ساخت دستگاه چمبر مدلی در مقیاس کوچک (ماکت) برای این دستگاه ساخته شد تا مشکلات اجرایی ساخت و سایر نکات مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۴- الف) نمایی از این مدل را نشان می‌دهد. همچنین جهت بررسی بهتر نحوه مدلسازی فیزیکی، مدل عددی چمبر ساخته شده و نحوه انجام آزمایش در داخل آن مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه چمبر از هشت قسمت مجزا ساخته شد. شکل (۴- ب) تصویری از مراحل ساخت دستگاه چمبر را نشان می‌دهد. این قسمتها عبارتند از: کف متحرک، چهار قسمت بدنه اصلی، لوله پیش حفاری، فک اعمال فشار همه‌جانبه، صفحات اعمال فشار همه‌جانبه. تمامی این قسمتها بوسیله پیچ به یکدیگر متصل شده و پس از هر بار آزمایش به راحتی محفظه خالی می‌گردد.

الف- ماکت ساخته شده برای چمبر آزمایشگاهی

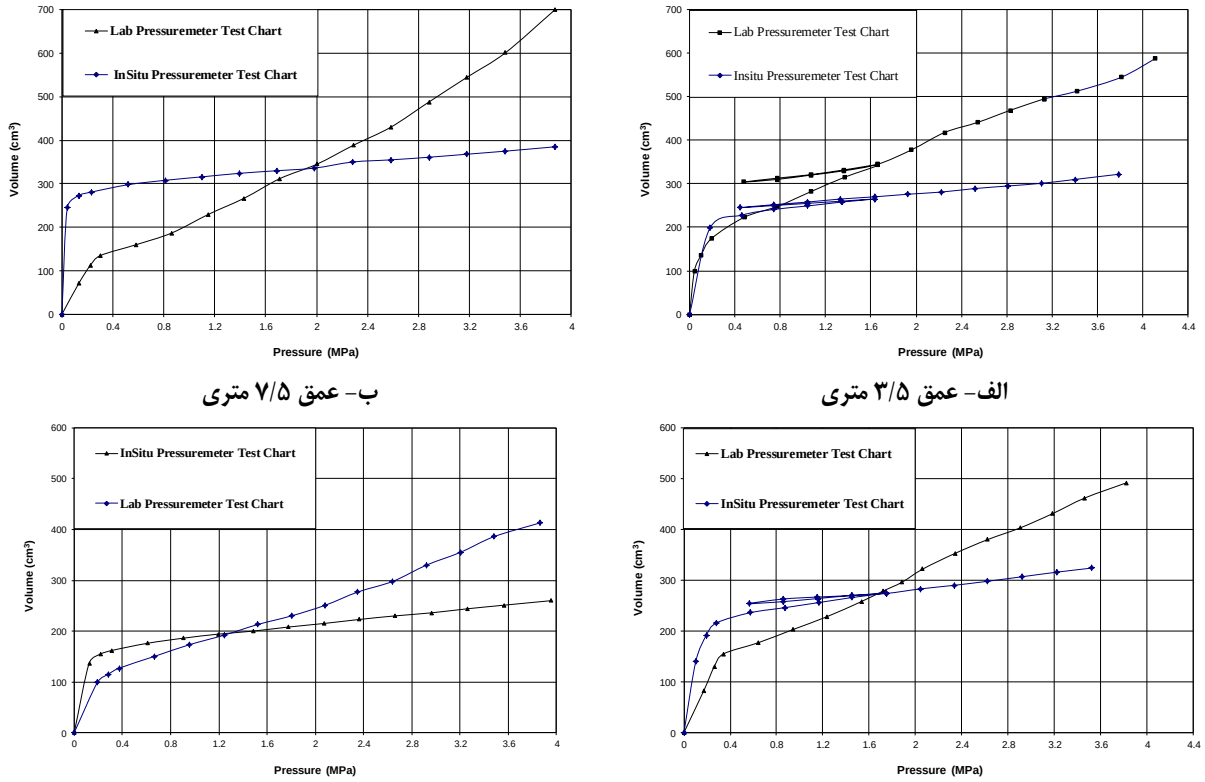
ب- دستگاه چمبر پس از ساخت

شکل ۴: تصاویر ساخت دستگاه چمبر (ماکت و دستگاه در سایز اصلی)

۴- مدلسازی و نتایج تحقیق

در این مرحله به بررسی پارامترهای مهم رفتار آبرفت درشت‌دانه تهران پرداخته شده است. این پارامترهای مهم شامل پارامترهای فیزیکی و مکانیکی هستند که در رفتار مقاومتی و تغییرشکلی این خاک اثرگذار هستند. این پارامترها، شامل پارامترهای تغییرشکلی مانند مدول تغییر شکل (E) و مدول واکنش بستر (Ks)، پارامترهای مقاومت برشی از جمله ضریب چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و پارامترهای خاصی از قبیل فشار حدی (P_L) و نسبت بیش تحکیمی (OCR) می‌باشند که بر روی رفتار آبرفت درشت‌دانه تأثیرگذار هستند. محاسبات مربوط به نحوه تفسیر نتایج آزمایش پرسیومتری بر اساس مرجع شماره [۷] انجام شده است و به دلیل کاهش حجم تعداد صفحات مقاله حاضر در اینجا ارایه نشده است.

پس از انجام آزمونهای پرسیومتری در محیط آزمایشگاه و داخل دستگاه چمبر با شرایط بازسازی شده، جهت بررسی رفتار تنش- کرنش آبرفت درشت دانه بهترین گزینه مقایسه نمودارهای حاصل از این آزمونها با نمودارهای آزمایشهای پرسیومتری انجام شده در شرایط برجا می¬باشد. در شکلهای (۵) و (۶) تصاویری از این مقایسه به ترتیب از اعماق ۳/۵ متری تا ۱۶/۵ متری ارایه شده¬اند. همانطور که از نمودارهای شکلهای ارایه شده مشاهده می‌گردد، رفتار آبرفت درشت‌دانه با سیمانتاسیون مقاومتر و مطلوبتر از خاکهای بازسازی‌شده می‌باشند. همچنین شیب نمودارهای بازسازی شده نسبتاً ثابت بوده ولی در آزمونهای برجا پس از شکستن اثر سیمانتاسیون شیب ثابت شده است. با مقایسه نتایج تنشهای افقی برجا مشاهده می‌گردد میزان تنشهای افقی آزمونهای برجا بیشتر بوده که این امر به دلیل وجود اثر سیمانتاسیون یا سفتی اولیه می‌باشد. تنها 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 نشاندهنده اعمال مناسب تنش همه‌جانبه و همچنین بازسازی مناسب می‌باشد. با مقایسه نتایج آزمونهای پرسیومتری در محیط برجا و آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاکهای بازسازی شده و همچنین دستخوردگی و خطاهای دستگاه سبب افزایش شیب محدوده خطی و در نتیجه کاهش مقادیر مدول الاستیسیته شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا حدود ۳۰ درصد مقادیر برجا بوده است.



الف- عمق ۳/۵ متری

ب- عمق ۷/۵ متری

ج- عمق ۱۱/۵ متری

د- عمق ۱۶/۵ متری

شکل ۵: مقایسه منحنی تنش- کرنش در آزمایشهای پرسیومتری برجا (Insitu) و آزمایشگاهی (Lab)

با مقایسه مقادیر نسبت تاریخچه تنشی حاصل از آزمونهای پرسیومتری 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 همه جانبه و دستخوردگی خاک سبب کاهش مقادیر نسبت تاریخچه تنشی شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا ۵۰ درصد مقادیر برجا بوده است. البته شایان ذکر است که کاهش مقادیر مدول پرسیومتری به خودی خود سبب کاهش این مقادیر می‌گردد. بر اساس نمودارهای حاصله از آزمایشهای پرسیومتری در محیط برجا و آزمایشگاهی، تفسیر نتایج پرسیومتری انجام شده است. این نتایج در جداول (۱) برای آزمایشات برجا و (۲) برای آزمونهای آزمایشگاهی ارایه شده است.

جدول ۱: نتایج آزمایشهای پرسیومتری انجام شده در پروژه تونل صدر- نیایش.

C_u (kg/cm²)	K_s (kg/cm³)	G (kg/cm²)	E_m/P_L	P_L (kg/cm²)	E_s (kg/cm²)	E_m (kg/cm²)	نوع خاك	عمق (m)	گمانه
0.23	8.7	60.0	2.9	55.3	452	162	GM	5-6.5	NB-1
0.34	9.5	65.1	4.4	40.2	492	176	GC	10-11.5	
0.35	15.6	107.3	4.9	58.6	810	290	GC	15-16.5	
0.28	15.4	105.6	4.8	59.5	797	285	GM	20-21.5	
0.38	15.3	105.2	4.8	59.3	794	284	GC	27-28.5	
0.31	5.3	36.4	8.0	12.3	274	98	GM	7-8.5	NB-2
0.36	14.0	96.0	4.7	55.6	723	259	GC	12-13.5	

C_u (kg/cm^2)	K_s (kg/cm^3)	G (kg/cm^2)	E_m/P_L	P_L (kg/cm^2)	E_s (kg/cm^2)	E_m (kg/cm^2)	نوع خاك	عمق (m)	گمانه
0.48	11.4	78.5	2.0	106.0	436	212	SC	22-23.5	
0.29	14.8	101.5	4.9	56.5	563	274	SM	28.5-30	
0.18	10.3	70.9	3.4	56.4	534	191	GP-GM	5-6.5	NB-3
0.21	15.5	97.8	4.8	55.3	738	264	GP-GM	12-13.5	
0.36	13.4	92.4	4.5	55.1	696	249	GC	18-19.5	
0.58	10.3	65.3	4.4	40.1	492	176	GC	5-6.5	NB-4
0.62	15.3	104.9	4.99	57.2	791	283	GC	10-11.5	
0.56	11.6	79.7	3.9	54.7	442	215	SC	18.5-20	
0.28	10.8	74.1	5.11	39.1	560	200	GC	26-27.5	
0.30	11.3	77.9	5.3	39.5	587	210	GC	31-32.5	

جدول ۲: نتایج آزمایشهای پرسیومتری انجام شده در محیط آزمایشگاه.

K_s (kg/cm^3)	C_u (kg/cm^2)	G (kg/cm^2)	E_m/P_L	P_L (kg/cm^2)	E_s (kg/cm^2)	E'_s (kg/cm^2)	E_m (kg/cm^2)	α	نوع خاک	عمق (m)	گمانه
9.5	0.19	61	2.9	55.6	470	652	163	0.25	GC	3.0 – 4.0	G
9.0	0.18	58	2.4	65.8	446	620	155	0.25	GC	7.0 – 8.0	
11.4	0.26	73	3.6	54.5	562	780	195	0.25	GC	11.0 – 12.0	
13.2	0.28	85	4.1	55.5	654	908	227	0.25	GC	16.0 – 17.0	
12.0	0.49	75	4.5	45.5	374	603	205	0.34	SC	3.0 – 4.0	S
16.6	0.42	105	5.2	54.7	515	832	283	0.34	SC	7.0 – 8.0	
11.4	0.56	72	3.6	53.7	355	573	195	0.34	SC	11.0 – 12.0	
12.3	0.55	78	3.9	54.0	383	618	210	0.34	SC	16.0 – 17.0	
8.6	0.17	55	2.7	54.2	405	592	148	0.25	GC	3.0 – 4.0	G
12.5	0.28	80	3.2	66.9	579	852	213	0.25	GC	7.0 – 8.0	
11.0	0.23	70	2.9	64.8	511	752	188	0.25	GC	11.0 – 12.0	
18.5	0.37	117	5.5	57.8	857	1260	315	0.25	GC	16.0 – 17.0	

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

اثر سیمانی‌شدن خاک‌ها یکی از موضوعات مورد علاقه محققین مهندسی ژئوتکنیک است. اولین تحقیقات ساختاری در این زمینه توسط ژانگ و کیو در سال ۲۰۰۵ انجام شد که با تحلیل آماری و بررسی عکس‌های میکروسکوپی مشخص گردید هرچه ضریب تجمع در خاک ماسه‌ای بالاتر باشد، درجه سیمانی‌شدن آن نیز بیشتر خواهد بود. این مطالعه همچنین تأکید کرد که بررسی ترکیب سیمان و مکانیسم‌های سیمانی‌شدن می‌تواند به درک بهتری از رفتار این نوع خاک‌ها منجر شود. برای بررسی اثر سیمانی‌شدن، از آزمون پرسیومتری استفاده شده است که پارامترهای رفتاری متعددی را استخراج می‌کند. همچنین جهت مقایسه شرایط سیمانی‌شده و نشده، دستگاه چمبر به کار گرفته شده است. نتایج آزمون‌ها با مدلسازی آزمایشگاهی در شرایط مشابه مقایسه شدند. خاک های درشت دانه سیمانی هم خواص خاک های درشت دانه و هم بتن را دارند. در نهایت در این تحقیق مشاهده شد که آزمون پرسیومتری، موفقیت قابل قبولی در تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر روی رفتار آبرفت درشت دانه است. با مقایسه مقادیر ضریب چسبندگی حاصل از آزمونهای پرسیومتری 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 درصد مقادیر برجا بوده است. با مقایسه نتایج آزمونهای پرسیومتری در محیط برجا و آزمایشگاهی، مشاهده می¬شود که نبود اثر سیمانتاسیون در خاکهای بازسازی شده و همچنین دستخوردگی و خطاهای دستگاه سبب افزایش شیب محدوده خطی و در نتیجه کاهش مقادیر مدول الاستیسیته شده است. این کاهش در بعضی اعماق تا حدود ۳۰ درصد مقادیر برجا بوده است.

۶- مراجع

۱- فلاحی طرقی، فرید و یثربی، سید شهاب الدین و اصغری، ابراهیم،۱۳۸۷،ارزیابی مدل های رفتاری خاک های دانه ای سیمانی شده با نگرشی به آبرفت درشت دانه تهران،چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران،تهران،https://civilica.com/doc/38061

۲-امامی محمد، یثربی سیدشهاب الدین ،بازیار محمدحسن.، تعیین پارامترهای رفتاری آبرفت درشت دانه ی تهران به کمک آزمایش های پرسیومتری برجا و آزمایشگاهی، مجله عمران شریف، تابستان ۱۳۹۵ , دوره , 2-32 شماره ; 2/2 از صفحه 43 تا صفحه. 55

۳- امین ایرجی ،(۱۳۹۸) .معرفی دو اصلاح موثر برای بهبود پیش بینی رفتار دینامیکی خاک های دانه ای در مدل رفتاری پاستور-زینکوویچ، نشریه مهندسی عمران فردوسی،32(1)، 73-92. magiran.com/p2013484

۴- قنبری و همکاران (۲۰۱۰)، مدول الاستیسیته آبرفت درشت¬دانه تهران، سومین کنفرانس زمین شناسی دانشگاه تربیت مدرس.

5- Clarke, B.G. "Pressuremeters in geotechnical design", 1995, Blackie Academic & professional Pub. 364p.

6- American Society for Testing and Materials, "Annual book of ASTM standards", D04-08, ASTM International Pub.

7- Korandeh, M.E., Yasrobi, S.S. Determination of behavioral parameters of coarse grain alluvium by in situ and laboratory pressuremeter tests. Arab J Geosci 15, 1714 (2022). https://doi.org/10.1007/s12517-022-10967 .

8- Emami M, Yasrebi S. Application of artificial neural networks in interpretation of pressuremeter test results. MCEJ 2014; 14 (5) :11-25. http://mcej.modares.ac.ir/article-16-5107-en.html

9- Pahlavan M., 2003. An Investigation to deformation of coarse grained alluvium of Tehran using Pressuremeter. A thesis for the degree of PHD, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran

10- Gerivani H. & Nikodel M.R. & Pahlavan P., An Investigation in Engineering Properties of Soft Rock in the Khark Island Using Menard Pressuremeter., The 4th of engineering geology conference, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran

11- Emami, M. (2014). Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium behavior by pressuremeter test results and Laboratory chamber (Doctoral dissertation, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran).

12- Emami M. Application of artifitial neural networks in pressuremeter test results. Master of Science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. 2009.

13- M. Haeri, A. Hamidi, E. Asghari, S. M. Hosseini, and D. G. Toll, The mechanical behavior of a gravely sand cemented with different cement type, 57th Canadian geotechnical conference.
14- Manassero, B. (1991), 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, 237-248.
15- Muraleetharan, K. K., Ravichandran, N., Miller, G. A., and Tan N. K., "Fully Coupled Analyses of Pressuremeter Tests in Unsaturated Soils," Proceedings of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT-ASIA 2004, UNSAT-ASIA 2003, 2003, pp. 313-318.
16- Emami, M. and Yasrobi, S.S., 2014. Modeling and interpretation of pressuremeter test results with artificial neural networks. Geotechnical and Geological Engineering, 32(2), pp.375-389.
17- Yasrebi SS, Emami M. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in prediction and interpretation of pressuremeter test results. InThe 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 2008 Oct 1 (pp. 1634-1638).
18- Penumadu, D. and Chameau, J. L., "Interpretation off Model Pressuremeter Test Using Automated Clay Calibration Chamber Data," Geotechnical Testing Journal, Vol. 21, No. 1, March 1998, pp. 18-30.
19- Penumadu, D., Skandarajah, A., and Chameau, J., "Strain-Rate Effects in Pressuremeter Testing Using a Cuboidal Shear Device: Experiments and Modeling," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, 1998, pp. 27-42.
20- Sweeney, B. P. and Clough, G. W. (1990), Design of large calibration chamber, Geotech, Testing J., ASTM, 13 (1), 36-44.
21- Tan, N. K. "Preparation of Model Unsaturated Soil Beds for Calibration Chamber Testing," Master of Science Thesis, University of Oklahoma, Norman, 2000.
22- Emami M, Yasrebi SS. Application of artificial neural networks in interpretation of pressuremeter test results. Modares Civil Engineering journal. 2014 Sep 10;14(20):11-25.
23- Emami M, Yasrebi S, Baziar M., EVALUATION OF COARSE GRAINED ALLUVIUM BEHAVIOR BASED ON PRESSUREMETER TESTS, Sharif Journal of Civil Engineering 32 (2.2), 43-55
24- M Emami, SS Yasrobi., Modelling of pressuremeter tests with artifitial neural networks - Sharif Journal of Civil Engineering, 2012
25- Yongshuang Z, Yongxin Q. Cements of sand loess and their cementation in north Shaanxi and west Shanxi. 工程地质学报. 2005 Jan 22;13(1):18-28.
26- Xu B, Luo W, Zou DG, Kong XJ, Zhou Y. The numerical simulation of the triaxial test of cemented coarse-grained soils. InAdvanced Materials Research 2011 (Vol. 250, pp. 2640-2644). Trans Tech Publications Ltd.
27- Mahawish, A., Bouazza, A. & Gates, W.P. Effect of particle size distribution on the bio-cementation of coarse aggregates. Acta Geotech. 13, 1019–1025 (2018). https://doi.org/10.1007/s11440-017-0604-7
28- Sangtarashha K, Fakher A, Pahlevan B. Variation of stiffness of Tehran coarse-grained soil with depth and strain. InDeformation Characteristics of Geomaterials 2011 (pp. 1007-1015). IOS Press.