



دستگاه بزرگ مقیاس ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک با امکان شبیه‌سازی نوع نشت آب

جواد محمودی، رضا پورحسینی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

خاک رمبنده
پتانسیل رمبندگی
نشت آب
دستگاه بزرگ مقیاس
شبیه‌سازی

خلاصه: خاک رمبنده به عنوان یک نمونه از خاک‌های مسئله‌دار می‌تواند در بسیاری از سازه‌ها مشکل ایجاد کند. خاک رمبنده بدون حضور آب، پایدار است، اما پس از ورود آب به این خاک، دچار نشست‌های قابل توجه و ناگهانی می‌شود. مهم‌ترین موضوع در برخورد با این خاک‌ها پیش‌بینی میزان نشست آن‌ها است. تا به امروز آزمایش‌های مختلفی به صورت آزمایشگاهی یا درجا برای تعیین پتانسیل رمبندگی طراحی شده است که متداول‌ترین آن‌ها آزمایش ادنومتر است. مهم‌ترین نقص آزمایش‌های موجود عدم امکان شبیه‌سازی نوع نشت آب در خاک است. در این مطالعه دستگاهی با قالب به قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۰ cm طراحی و ساخته شد که دارای امکان شبیه‌سازی نوع نشت آب است و می‌تواند بر اساس منشاء ورود آب، میزان پتانسیل رمبندگی را اندازه‌گیری نماید. این دستگاه الگوهای نشت آب را بر اساس جهت حرکت آب (از بالا به پایین یا از پایین به بالا) و توزیع نشت (نقطه‌ای یا گسترده) به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی و شبیه‌سازی می‌کند. نتایج آزمایشگاهی این دستگاه بر روی یک خاک رمبنده نمونه نشان می‌دهد که پتانسیل رمبندگی وابسته به الگو نشت آب در خاک است و نمی‌توان از یک پتانسیل رمبندگی برای تمام الگوهای نشت آب استفاده کرد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی بیشترین پتانسیل رمبندگی مربوط به الگوی نشت آب از بالا به پایین و به صورت گسترده و کمترین آن مربوط به الگو نشت آب از پایین به بالا و به صورت نقطه‌ای است.

۱- مقدمه

خاک رمبنده بیش از ۸۰ سال است که به طور گسترده به عنوان یک مسئله مهم در زمینه ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که از اسم آن‌ها مشخص است، این خاک‌ها می‌توانند در اثر خیس شدن (همراه با افزایش سربار یا بدون افزایش سربار) کاهش حجم چشم‌گیری از خود نشان دهند و مخاطراتی را برای پروژه‌های ژئوتکنیکی به وجود آورند.

خاک‌های رمبنده در بسیاری از نقاط دنیا از جمله مرکز و جنوب ایالات متحده، چین، هندوستان، خاورمیانه، روسیه، جنوب آمریکا و آفریقا جنوبی یافت می‌شوند [۱-۳].

از ویژگی‌های شاخص این خاک‌ها، وزن مخصوص کم، ساختار باز، پوکی بالا، نهشته جوان، درصد رطوبت کم و پیوند ضعیف بین ذرات است [۴-۶].

میزان نشست خاک رمبنده وابسته به پارامترهای مختلفی است مهم‌ترین این پارامترها شامل درصد رطوبت، وزن مخصوص خشک اولیه، درجه تراکم،

درصد ریزدانه، فشار وارد شده و کیفیت دانه‌بندی خاک می‌شود [۷-۱۲].

می‌توان گفت که خاک‌های رمبنده، خاکی هستند که در وضعیت خشک در حالت پایداری قرار دارند اما حساس به تغییر حجم قابل توجه هستند که این تغییر حجم می‌تواند با خیس شدن به تنهایی یا خیس شدن همراه با بارهای استاتیکی و دینامیکی در زمان اشباع شدن یا نزدیک به اشباع به وجود آید. اگرچه در حالت کلی مطالعات مرتبط با خاک‌های رمبنده به بارهای استاتیکی محدود می‌گردد و نشست‌های به وجود آمده در اثر بارهای دینامیکی در قالب پدیده روانگرایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱۳].

تا به امروز مطالعات زیادی بر روی مکانیزم رمبندگی صورت گرفته است که لی^۱ و همکارانش ۲۰۱۶ در یک مقاله مروری این مطالعات را به سه دسته روش‌های سنتی، روش‌های میکروسکوپی و روش‌های مبتنی بر مکانیک خاک تقسیم‌بندی کردند [۱۴].

خاک‌های رمبنده فقط به ساختمان‌های قرار گرفته بر روی خاک رمبنده خسارت وارد نمی‌کنند بلکه بخش زیادی از خسارت این خاک‌ها به روسازی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r_porhoseini@yazd.ac.ir

1 Li

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.





شکل ۱. نحوه مدل سازی آبیاری قطره ای

Fig. 1. How to model drip irrigation

وانداناپو^۲ و همکارانش ۲۰۱۷ نشست به وجود آمده در خاک رمینده در اثر آبیاری قطره ای را مورد بررسی قرار دادند. آن ها در مطالعه خود از یک مدل آزمایشگاهی استفاده نمودند که در یک مخزن مکعبی شکل با ابعاد m ۱ ابتدا برای شبیه سازی آب زیرزمینی مقداری آب و بعد از آن خاک رمینده ریخته شد. در نهایت سه مدل با سطح آب زیرزمینی مختلف (۵۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ mm زیر صفحه بارگذاری) مدل سازی گردید. مطابق شکل ۱ از یک سری لوله جهت مدل سازی آبیاری قطره ای استفاده شده و پس از آن که سر بار به میزان مشخص رسید آب از سطح خاک با سیکل زمانی ۳۰ دقیقه در هر ۱۲ ساعت وارد خاک می شود و میزان نشست به وجود آمده در سطح خاک در زمان های مختلف ثبت می شود. در این مطالعه میزان نشست و مدت زمان مورد نیاز برای رمیندگی کامل برای هر سه مدل اندازه گیری گردید که بر اساس این نتایج بیشترین نشست برای مدل با سطح آب زیر زمینی mm ۳۰۰ زیر سطح بارگذاری و بیشترین زمان برای اتمام رمیندگی مربوط به مدل با سطح آب زیر زمینی mm ۵۰۰ زیر سطح بارگذاری است [۱۸].

مشحور^۳ و همکارانش ۲۰۱۹ با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی تاثیر سرعت اشباع شدن را بر روی میزان نیروی درگ ایجاد شده در شمع های قرار گرفته در خاک های رمینده را مورد بررسی قرار دادند. وقتی خاک رمینده

جاده های قرار گرفته بر روی این نوع خاک مسئله دار گزارش گردیده است. این خاک ها می توانند مشکلات زیادی برای پایداری شیروانی ها، تونل های زیرزمینی، لوله های زیرزمینی و ... ایجاد نمایند.

ساخت و ساز ساختمان ها بر روی خاک های رمینده، که به طور معمول در نقاط خشک و نیمه خشک قرار دارند نیازمند پایداری یا بهسازی این خاک ها است [۱۵].

آب می تواند از منابع مختلفی مانند بارندگی شدید و مداوم، آبیاری بیش از حد، نشست و شکست لوله های انتقال آب و فاضلاب و بالا آمدن سطح آب زیر زمینی وارد خاک رمینده شود [۱۶]، اما متأسفانه تا به امروز مطالعات کمی بر روی تاثیر نوع نشست آب بر روی خاک رمینده انجام گرفته است.

الواجی^۱ ۲۰۰۸ تغییر شکل لوله های مدفون ناشی از نشست آب از این لوله ها را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از نرم افزار اجزا محدود غیرخطی Z-soil جهت شبیه سازی نشست آب در لوله های مدفون استفاده گردید. در این مدل سازی ناحیه اشباع شده در اثر نشست آب از لوله های مدفون تخمین زده شده است. مطالعات با افزایش عمق اشباع شدگی از ۰ تا ۷۰ سانتی متر زیر سطح لوله انجام گردیده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش عمق اشباع شدگی در اثر نشست آب میزان نشست و تغییر شکل لوله های مدفون افزایش می یابد [۱۷].

2 Vandanapu

3 Mashhour

1 Alawaji

۲-۱- روش‌های آزمایشگاهی

عموماً نتایج آزمایش‌های ادنومتر برای آنالیزهای یک بعدی و آزمایش‌های سه محوری برای آنالیزهای سه بعدی استفاده می‌گردند. لاوتن^۱ ۱۹۸۹ نشان داد که اطلاعات اضافی که از آزمایش سه محوری به دست می‌آید نسبت به آزمایش ادنومتر کم است، به همین دلیل آزمایش ادنومتر متداول‌تر است [۲۱].

دو نوع آزمایش ادنومتر برای تعیین پتانسیل ربنندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد: آزمایش ادنومتر تک^۲ و آزمایش ادنومتر دوگانه^۳. آزمایش ادنومتر تک بر اساس روش خیس کردن بعد از بارگذاری انجام می‌گیرد، تنش سربار به صورت تدریجی اعمال می‌گردد و زمانی که کرنش ثابت شد نمونه تحت تنش اعمال شده غرقاب می‌گردد.

قاعده آزمایش ادنومتر دوگانه بر این اساس است که تغییر شکل‌های به وجود آمده در اثر خیس شدن مستقل از مسیر بارگذاری-خیس شدن خواهد بود. این آزمایش با استفاده از دو نمونه یکسان انجام می‌گردد، یکی به روش آزمایش ادنومتر معمول در درصد رطوبت طبیعی انجام می‌گردد و نمونه دیگر پس از غرقاب شدن مورد بارگذاری قرار می‌گیرد. شکل ۲ نتایج یک آزمایش ادنومتر دوگانه را نشان می‌دهد.

ایادت^۴ و همکارانش ۲۰۰۷ از دستگاه نفوذ مخروط که معمولاً برای اندازه‌گیری حد خمیری و حد روانی استفاده می‌شود، جهت اندازه‌گیری پتانسیل ربنندگی استفاده کردند. آن‌ها یک سری آزمایش با استفاده از دو دستگاه نفوذ مخروط و ادنومتر طراحی کردند و با استفاده از نتایج آن‌ها یک درون‌یابی بین پتانسیل ربنندگی و میزان نفوذ مخروط انجام دادند. با استفاده از رابطه به دست آمده می‌توان با انجام آزمایش نفوذ مخروط میزان پتانسیل ربنندگی در خاک را پیش‌بینی نمود [۲۳].

ASTM D5333 روش اندازه‌گیری پتانسیل ربنندگی خاک‌ها را با استفاده از آزمایش ادنومتر تک تشریح می‌کند. این استاندارد ابتدا پتانسیل ربنندگی^۵ (Ic) را معرفی می‌کند که برابر با میزان ربنندگی خاک است که در هر سطح تنشی می‌تواند با استفاده از معادله (۲) محاسبه گردد.

$$I_c = \left[\frac{d_f - d_i}{h_0} \right] 100 \quad (2)$$

- 1 Lawton
- 2 Single-oedometer
- 3 Double-oedometer
- 4 Ayadat
- 5 Collapse potential

اشباع می‌شود و نشست‌های ناگهانی و بزرگی را تجربه می‌کند باعث ایجاد نیروی اصطکاک جداره منفی در طول شمع می‌شود، این اصطکاک جداره منفی باعث به وجود آمدن نیروی درگ قابل توجهی در شمع می‌گردد. در این مطالعه آب از پایین لایه خاک ربننده به صورت گسترده وارد خاک می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند تا کاملاً اشباع شود. زمان اشباع شدن خاک با سه مقدار ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه به صورت متغیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زمان اشباع شدن خاک، نیروی درگ به وجود آمده در شمع کاهش می‌یابد [۱۹].

در این مطالعه طراحی و ساخت دستگاهی با امکان شبیه‌سازی انواع نشست آب در خاک ربننده ارائه گردیده و اثر جهت حرکت آب (از بالا یا از پایین) و نحوه نشست (نقطه‌ای یا گسترده) بر روی پتانسیل ربنندگی با استفاده از این دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. پتانسیل ربنندگی به دست آمده از این دستگاه برای الگوهای مختلف نشست آب با نتایج دستگاه ادنومتر متداول مقایسه گردید.

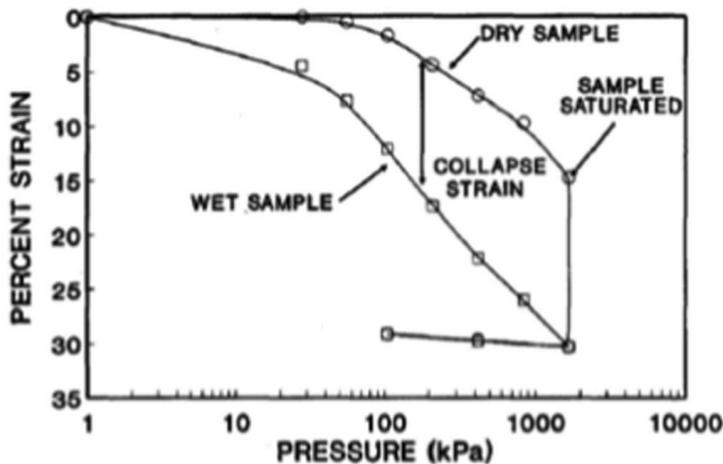
۲- ارزیابی پتانسیل ربنندگی

پتانسیل ربنندگی یک شاخص از میزان تغییر حجم کل یک خاک است که در اثر بارگذاری و خیس شدن از خود نشان می‌دهد. در نشست یک بعدی، پتانسیل ربنندگی با استفاده از تغییر ضخامت نمونه پس از خیس شدن و اعمال بار محاسبه می‌گردد. معادله (۱) یک تعریف مهندسی از پتانسیل ربنندگی با استفاده از تغییرات نسبت تخلخل را نشان می‌دهد [۲۰].

$$C_p = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \times 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن Cp پتانسیل ربنندگی، Δe تغییر نسبت تخلخل ناشی از خیس شدن، e0 نسبت تخلخل اولیه، Δh تغییر ارتفاع نمونه ناشی از خیس شدن و h0 ارتفاع اولیه نمونه است.

روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری پتانسیل ربنندگی خاک‌ها وجود دارد که شامل روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی می‌گردد. معمول‌ترین روش‌های آزمایشگاهی استفاده از آزمایش ادنومتر و آزمایش سه محوری است. مهم‌ترین مزیت روش‌های آزمایشگاهی کنترل سه پارامتر مهم (درجه اشباع، وزن مخصوص خشک و تنش اعمالی) است که می‌تواند بر پتانسیل ربنندگی تاثیر بگذارند [۸].



شکل ۲. نتیجه یک آزمایش ادنومتر دوبل [۲۲]

Fig. 2. Result of a double oedometer test

جدول ۱. طبقه‌بندی شاخص رمبندگی [۲۴]

Table 1. Classification of Collapse Index

شاخص رمبندگی	درجه رمبندگی
۰	ندارد
۲-۰/۱	اندک
۶-۲/۱	متوسط
۱۰-۶/۱	تا حدی شدید
>۱۰	شدید

آزمایش رمبندگی درجا را با استفاده از باکس‌های خاک قرار گرفته بر روی یک سطح بتنی را مطابق شکل ۳ پیشنهاد دادند. باکس‌های خاک بر روی پی ساخته شده جهت تامین فشار اعمالی مورد نظر قرار می‌گیرند و بعد از آن که فشار مورد نظر اعمال گردید، آب جهت افزایش رطوبت خاک زیر پی به گودال اضافه می‌گردد [۲۵]. این آزمایش فقط ارزیابی پتانسیل رمبندگی خاک‌های سطحی را تامین می‌کند.

۳- طرح دستگاه با قابلیت شبیه‌سازی نوع نشست آب

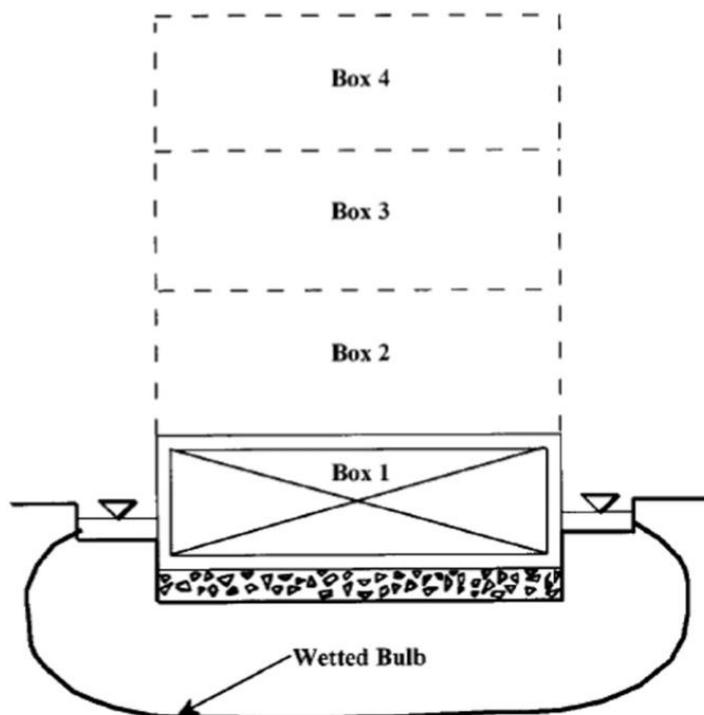
متأسفانه تا به امروز تحقیقات اندکی بر روی تاثیر نوع اشباع شدن خاک بر روی خاک‌های رمبند انجام گرفته است. به طور کلی نشست آب را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: الف) منابعی که به صورت گسترده و از پایین

که در آن I_c پتانسیل رمبندگی، df قرائت گیج بعد از خیس شدن، d_i قرائت گیج قبل از خیس شدن و h_0 ارتفاع اولیه نمونه است. این استاندارد در ادامه شاخص رمبندگی (I_e) را معرفی می‌کند که میزان پتانسیل رمبندگی در تنش اعمالی مرجع 200 kPa را نشان می‌دهد که بر اساس مقادیر شاخص رمبندگی، درجه رمبندگی نمونه می‌تواند مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی گردد [۲۴].

۲-۲- روش‌های صحرائی

پتانسیل رمبندگی می‌تواند با مقادیر N آزمایش SPT و مقاومت نوک آزمایش CPT مرتبط گردد. علاوه بر این محمود^۲ و همکارانش ۱۹۹۵ یک

1 Collapse index
2 Mahmoud



شکل ۳. آزمایش رمبندگی درجا [۲۵]

Fig. 3. In-situ collapse potential test

۳-۱ - سیستم بارگذاری

در این دستگاه برای بارگذاری نمونه و اعمال تنش‌های مورد نظر بر روی سطح نمونه از یک سیستم بارگذاری اهرمی استفاده گردید که نیرو را $4/5$ برابر می‌کند. در انتهای سمت چپ تیر یک محفظه قرار داده شده تا وزنه‌های اعمال نیرو روی آن قرار گیرند و در انتهای سمت راست تیر یک وزنه تعادلی قرار داده می‌شود. تیر متحرک به وسیله لولا به یک تکیه‌گاه کاملاً صلب متصل شده است.

در سمت چپ تکیه‌گاه، تیر به دو قسمت با نسبت 1 به $3/5$ تقسیم شده است و مطابق با شکل ۵ در وسط این دو قسمت یک صفحه فلزی جوش داده شده است تا بتواند نیرو را به وسیله دو پیچ عمودی بر روی نمونه انتقال دهد. با استفاده از این دو پیچ می‌توان محل اعمال نیرو را به صورت عمودی جابجا نمود. انتهای پیچ‌ها به یک صفحه دیگر به موازات صفحه بالا متصل می‌شود. در وسط صفحه پایین یک پیچ دیگر تعبیه شده است که به صورت عمودی تنظیم و جابه‌جا می‌شود و نیرو را به صفحه بارگذاری قرار گرفته

به بالا باعث اشباع خاک می‌گردند مانند بالا آمدن سطح آب زیرزمینی (ب) منابعی که به صورت گسترده و از بالا به پایین باعث اشباع خاک می‌گردند مانند جاری شدن سیل (ج) منابعی که به صورت نقطه‌ای از پایین به بالا باعث اشباع شدن یک ناحیه خاص از خاک رمبند می‌گردند مانند نشست از لوله‌های مدفون (د) منابعی که به صورت نقطه‌ای از بالا به پایین باعث اشباع شدن یک ناحیه خاص از خاک رمبند می‌گردند مانند نشست لوله‌های سطحی.

در آزمایش‌های موجود آب به صورت یک دفعه از بالا و پایین و به صورت گسترده وارد نمونه خاک می‌شود که این نوع اشباع شدگی نمی‌تواند مدل مناسبی برای تحلیل انواع شرایط اشباع شدن خاک در واقعیت باشد.

با توجه به محدودیت دستگاه‌های موجود طرحی تهیه شد که دارای قابلیت شبیه‌سازی انواع نشست آب در خاک است. مطابق با شکل ۴ دستگاه ساخته شده از سه قسمت، شامل سیستم بارگذاری، سلول نمونه و سیستم اندازه‌گیری و ثبت جابه‌جایی‌ها تشکیل می‌شود. در ادامه هر کدام از این قسمت‌ها شرح داده شده است.



شکل ۴. اجزای دستگاه ارزیابی پتانسیل رمبندگی با قابلیت مدل‌سازی نوع نشت آب

Fig. 4. Collapse potential measurement apparatus with the ability to simulate the patterns of water infiltration



شکل ۵. نحوه انتقال نیرو به صفحه بارگذاری روی نمونه

Fig. 5. How to transfer force to the loading plate on the sample



شکل ۶. سلول‌ها

Fig. 6. Cells

یا افزایش پیدا کند.

برای اطمینان از صلبیت سلول‌ها استفاده شده، هر کدام از سلول به صورت جداگانه مورد بارگذاری قرار گرفتند و تغییرات قطر سلول‌ها توسط یک جابه‌جایی‌سنج در طی مراحل بارگذاری اندازه‌گیری شد. در هر دو سلول مقدار تغییر قطر سلول‌ها بسیار ناچیز و نزدیک به صفر بود که می‌توان نتیجه گرفت که تغییر حجم به وجود آمده در نمونه‌ها فقط ناشی از تغییر ارتفاع نمونه‌هاست و در طی بارگذاری سطح مقطع نمونه‌ها ثابت است.

۳-۳- سیستم اندازه‌گیری و ثبت جابه‌جایی‌ها

برای اندازه‌گیری نشست‌ها در هر مرحله از بارگذاری و پس از اشباع کردن نمونه مطابق با شکل ۷ از یک جابه‌جایی‌سنج (LVDT)، دیتالاگر و کامپیوتر استفاده شد. جابه‌جایی‌سنج بر روی صفحه انتقال دهنده نیرو به نمونه قرار می‌گیرد و با دقت 0.01 mm مقدار نشست‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر اندازه‌گیری شده در حافظه ذخیره می‌گردند.

بر روی نمونه انتقال می‌دهد. پایین این پیچ و بالای صفحه بارگذاری نیم کره‌های محدب و مقعر طراحی شده است.

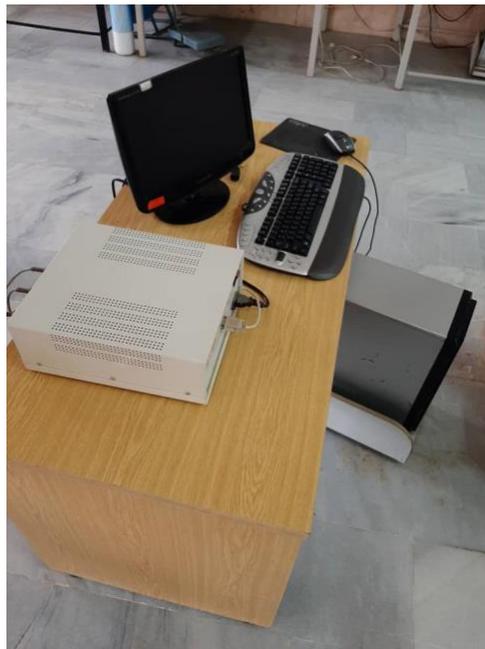
مطابق با شکل ۳، در انتهای تیر، قبل از محل قرارگیری وزنه‌ها، یک تکیه‌گاه موقت تعبیه شده است که دارای دو پیچ متحرک است و باعث می‌شود که اعمال بار ماهیت دینامیکی پیدا نکند.

۳-۲- سلول نمونه

برای اینکه روش‌های مختلف نشست آب در خاک قابلیت مدل‌سازی داشته باشند ابعاد سلول نسبت به دستگاه ادنومتر افزایش پیدا کرد و از نمونه‌ها با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۰ cm در این دستگاه استفاده شد تا تاثیر الگوهای نشست آب در خاک قابل بررسی باشند. مطابق با شکل ۶ برای قرار دادن نمونه در دستگاه از یک سلول فلزی با قطر داخلی ۱۴ cm و ارتفاع ۱۲ برای مدل‌سازی اشباع از بالا به سمت پایین و از یک سلول پلکسی گلس با قطر داخلی ۱۴ cm و ارتفاع ۲۰ cm برای مدل‌سازی اشباع از پایین به سمت بالا استفاده شد. با توجه به ابعاد سلول‌ها، ارتفاع نمونه می‌تواند کاهش



ب



الف

شکل ۷-الف. دیتالاگر و کامپیوتر ب. جابه‌جایی سنج (LVDT)

Fig. 7-a. Data logger and computer b. displacement gauge (LVDT)

است. مطابق با شکل ۹ آب از بالا وارد این قطعه می‌شود و از طریق چهار سوراخ تعبیه شده بر روی صفحه میانی، آب وارد پایین قطعه و از طریق سوراخ ایجاد شده در مرکز صفحه دایره‌ای شکل زیر قطعه وارد نمونه خاک می‌شود. برای اینکه حد آب ثابت باشد به فاصله ۷ سانتی‌متر از کف استوانه، یک سوراخ ایجاد شده تا آب اضافی از داخل استوانه خارج شود.

۴-۲- اشباع از بالا به سمت پایین و به صورت گسترده

برای مدل‌سازی این نوع اشباع شدگی از ابزار و قطعات قسمت قبل استفاده می‌شود با این تفاوت که مطابق با شکل ۱۰ در این قسمت به جای صفحه با یک سوراخ از صفحه‌ای با پنج سوراخ با قطر ۱ cm استفاده می‌شود. افزایش تعداد سوراخ‌ها باعث می‌شود که کل سطح خاک از بالا خیس شود و آب به قسمت پایین نمونه انتقال یابد.

۴-۳- اشباع از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ای

این نوع از اشباع شدن زمانی اتفاق می‌افتد که آب از یک نقطه خاص در پایین لایه خاک رمبنده نشأت کند و به سمت بالا حرکت کند و باعث اشباع شدن این لایه خاک شود. از این اشباع شدگی می‌توان به نشأت لوله‌های مدفون اشاره نمود.

۴-۴- مدل‌سازی الگوهای مختلف نشأت آب

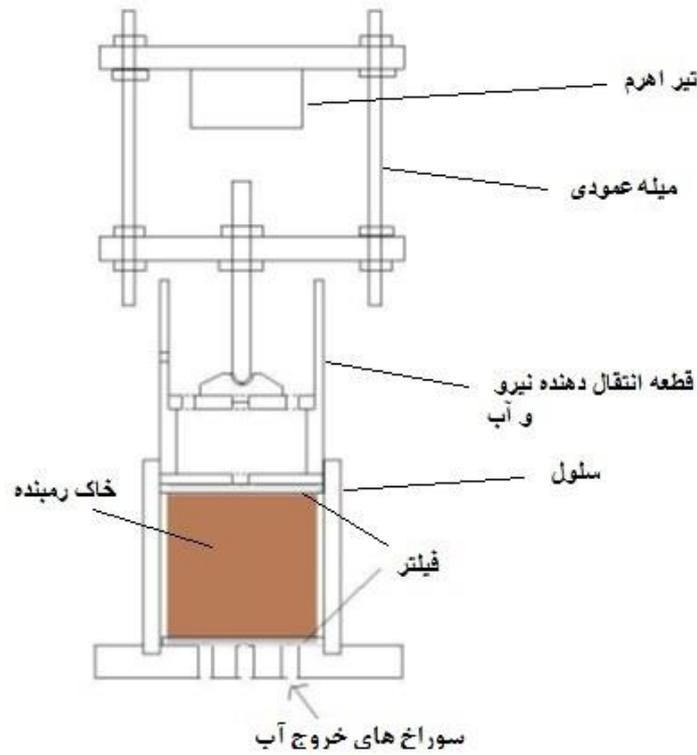
هدف از طرح این دستگاه مدل‌سازی چهار الگوی نشأت آب به داخل خاک رمبنده است تا بتوان میزان و سرعت نشست‌ها را برای هر الگو نشأت آب در خاک اندازه‌گیری کرد. در ادامه نحوه مدل‌سازی آزمایشگاهی می‌آید.

۴-۱- اشباع از بالا به سمت پایین و به صورت نقطه‌ای

این نوع اشباع شدگی در طبیعت زیاد اتفاق می‌افتد که به عنوان مثال می‌توان به نشأت لوله‌های سطحی، نشأت فاضلاب شهری و آبیاری کشاورزی اشاره کرد.

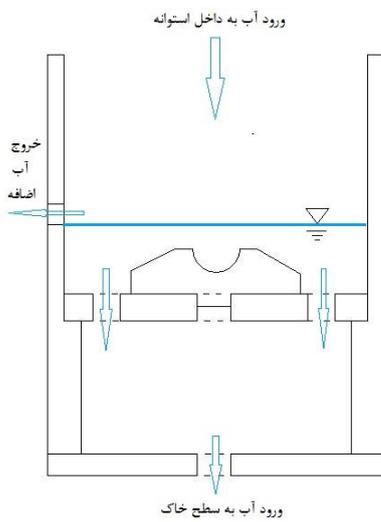
در مدل‌سازی این نوع نشأت آب، ابتدا نمونه بر اساس دست خورده یا دست نخورده بودن داخل سلول قرار می‌گیرد و پس از آماده‌سازی یک قطعه از قبل آماده شده روی سطح خاک قرار می‌گیرد این قطعه به گونه‌ای است که هم بار را بر روی سطح خاک انتقال دهد و هم اجازه دهد که آب از یک نقطه وارد خاک شود. این قطعه به صورت استوانه است و مطابق شکل ۸ بار بر روی این قطعه انتقال داده می‌شود و توسط قسمت مقعر شکل و صفحه زیر آن به جدار خارجی قطعه منتقل می‌شود و بعد توسط صفحه زیر این قطعه به سطح خاک انتقال می‌یابد.

هدف دوم این قطعه انتقال آب به نقطه مرکز سطح بالای نمونه خاک



شکل ۸. نحوه انتقال نیرو به سطح خاک

Fig. 8. How to transfer force to soil surface



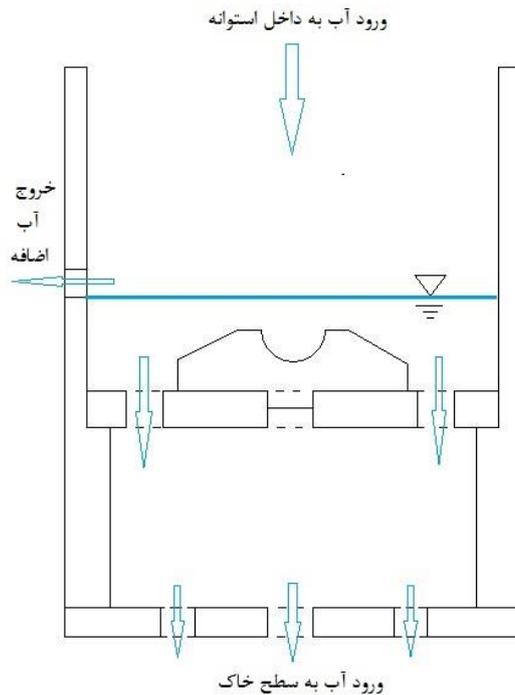
ب



الف

شکل ۹-الف. قطعه انتقال دهنده نیرو و آب ب. نحوه انتقال آب

Fig.9-a. Force and water transmission piece b) How to transfer water



شکل ۱۰. نحوه انتقال آب در اشباع شدگی به روشی از بالا به پایین و به صورت گسترده

Fig. 10. How to transfer water in top-expanding water infiltration pattern

مدل‌سازی این نوع اشباع شدگی مانند اشباع شدگی از پایین به سمت بالا و به صورت نقطه‌ای است با این تفاوت که صفحه اتصال دهنده استوانه پایین و سلول تغییر می‌کند و مطابق شکل ۱۲ از یک صفحه جدید با ۵ سوراخ استفاده شد. افزایش تعداد سوراخ‌ها باعث می‌شود که کل سطح خاک از پایین خیس شود و به سمت بالا حرکت کند.

۵- بررسی نتایج دستگاه

در مطالعات آزمایشگاهی از یک نمونه خاک رمبنده ساخته شده در آزمایشگاه استفاده گردید. مطابق با مطالعات هانا^۱ و سلیمان^۲ [۲۶] می‌توان با ترکیب ماسه ریزدانه و رس کائوین و اضافه کردن مقداری رطوبت یک خاک رمبنده ساخت. با استفاده از نسبت‌های مختلف رس به ماسه و وزن مخصوص‌های متفاوت (انرژی تراکم متفاوت) می‌توان نمونه‌های با پتانسیل رمبندگی مختلف ساخت.

راجرس ۱۹۹۴ خاک‌های رمبنده را از نظر نحوه تشکیل شدن به دو دسته طبیعی و متراکم تقسیم‌بندی نمود [۴]. که خاک‌های طبیعی توسط

برای مدل‌سازی این نوع اشباع شدگی از روشی متفاوت با روش‌های حرکت آب از بالا به پایین استفاده شد. مطابق با شکل ۱۱ سلول بر روی یک استوانه فلزی قرار می‌گیرد این استوانه دارای چهار سوراخ بر روی دیواره خود است تا آب به راحتی وارد استوانه شود. سلول توسط یک صفحه دایره‌ای شکل که یک سوراخ در مرکز آن قرار دارد به این استوانه متصل می‌شود. برای انتقال آب به داخل خاک، استوانه و سلول روی آن داخل یک محفظه پلاستیکی روباز قرار می‌گیرند. سطح آب داخل محفظه پس از پر شدن توسط یک شیر خروجی تا ارتفاع ۷ cm بالاتر از سطح خاک ثابت نگه داشته می‌شود. آب از چهار سوراخ اطراف استوانه پایین وارد استوانه می‌شود و توسط سوراخ قرار گرفته بر روی صفحه زیر نمونه و سلول، آب وارد نمونه می‌شود. سلول استفاده شده در این حالت ارتفاع بیشتری دارد تا آب از بالا وارد نمونه نشود.

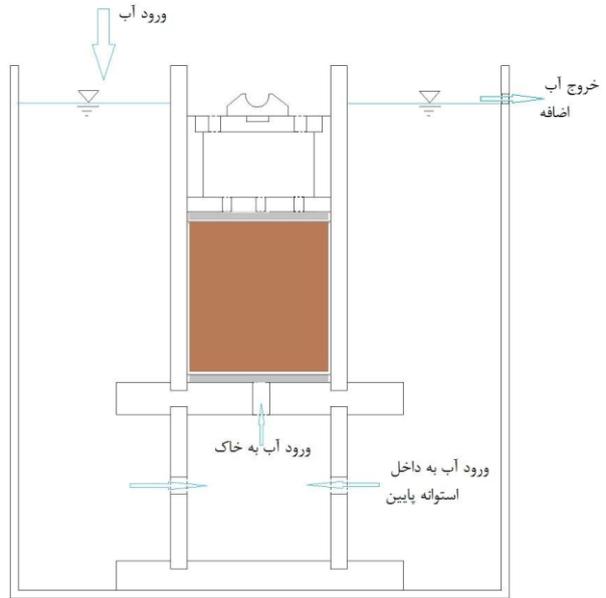
۴-۴ اشباع از پایین به سمت بالا و به صورت گسترده

این نوع نشست آب به داخل خاک مربوط به زمانی است که آب از پایین به صورت یک سطح گسترده شروع به بالا آمدن کند. برای این نوع اشباع شدگی می‌توان به بالا آمدن سطح آب زیرزمینی اشاره نمود.

1 Hanna
2 Soliman



ب



الف

شکل ۱۱-الف. نحوه ورود آب به خاک در اشباع شدگی به روش از پایین به بالا و به صورت نقطه ای ب. ثابت نگه داشتن ارتفاع آب

Fig. 11-a. How to enter water to soil in bottom-point water infiltration pattern b. Keeping the water level constant



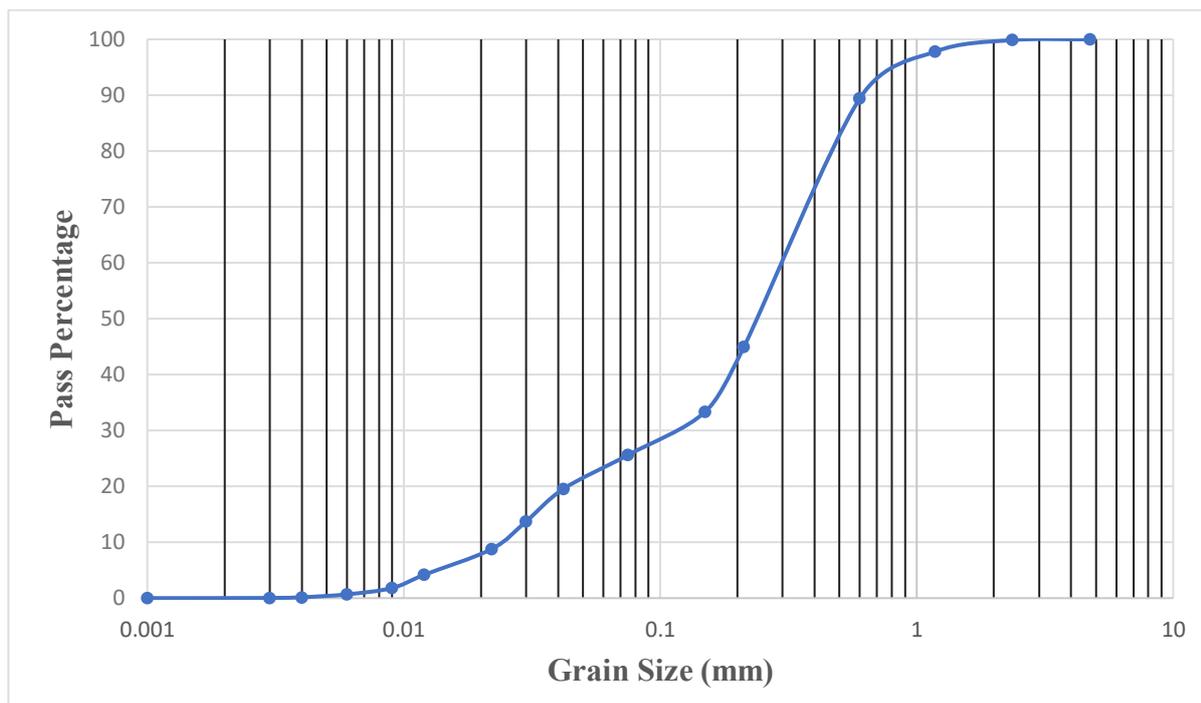
شکل ۱۲. صفحه استفاده شده برای ورود آب به صورت گسترده در حرکت آب از پایین به بالا

Fig. 12. The plate used to enter water expandingly in the movement of water from the bottom to the top

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

Table 2. Physical property of soil used

ویژگی	نوع خاک	γ (kN/m ³)	ω (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	ω_{opt} (%)	Gs	Cu	Cc
مقدار	SW-SC	۱۳	۵	۲۰/۹۹	۸/۳	۲/۷۲	۱۵	۲/۴



شکل ۱۳. منحنی دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری خاک رمنده استفاده شده

Fig.13. The mechanical and hydrometric gradation curve of collapsible soil is used

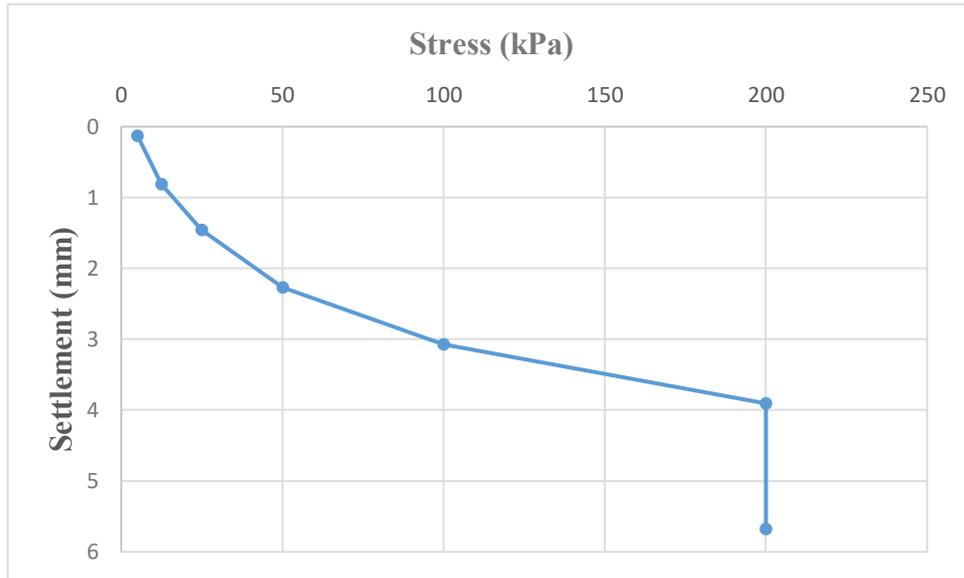
داخل دستگاه ادنومتر قرار گرفت و پس از رسیدن به تنش ۲۰۰ kPa اشباع گردید. در شکل ۱۴ نمودار جابه‌جایی در مقابل تنش مربوط به این آزمایش نشان داده شده است که بر اساس جابه‌جایی‌های ثبت شده قبل و بعد از اشباع شدن نمونه، پتانسیل رمندهی این نمونه برابر با ۸/۸۷ است و بر اساس استاندارد ASTM این خاک در دسته خاک‌های با درجه رمندهی تا حدی شدید قرار می‌گیرد.

برای بررسی عملکرد دستگاه ساخته شده ۴ آزمایش با روش‌های مختلف نشن آب در خاک انجام شد. در این آزمایش‌ها ابعاد نمونه متناسب با ابعاد سلول دستگاه ساخته شده نسبت به آزمایش ادنومتر افزایش پیدا کرد و سایر

طبیعت ساخته می‌شوند و خاک‌های متراکم توسط انسان در خاکریزها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از انواع خاک‌هایی که در طبیعت ساخته می‌شوند خاک‌های بادرفتی هستند که در این مطالعه از این نوع خاک‌ها الگوبرداری شد و برای ساخت نمونه از روش بارشی استفاده شد و خاک ساخته شده از ارتفاع ۲۰ cm رها و داخل قالب ادنومتر ریخته شد.

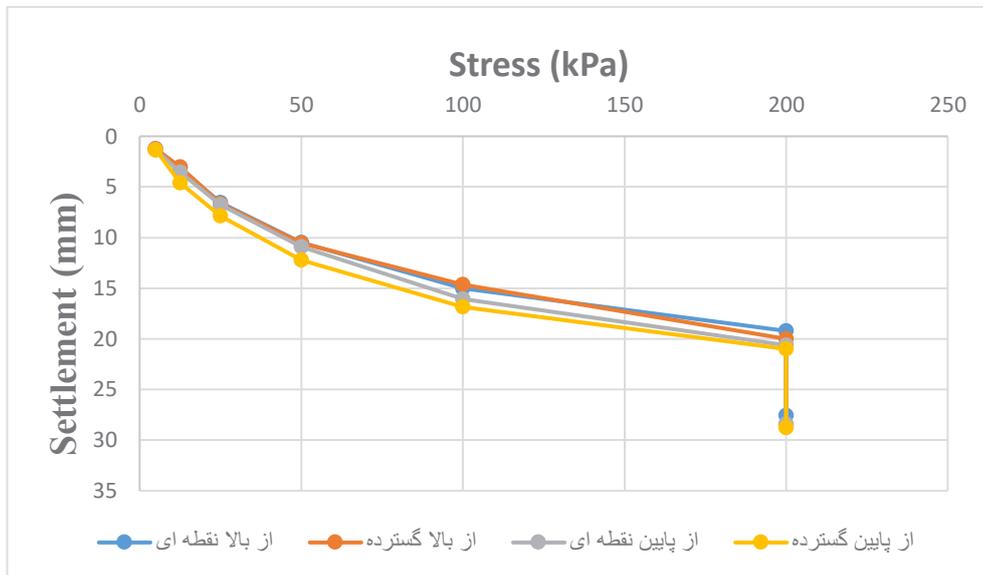
در این مطالعه با نسبت وزنی رس به ماسه ۳۰٪ و رطوبت ۵٪ نمونه‌ای تولید گردید که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. نمودار دانه‌بندی مکانیکی و هیدرومتری این نمونه در شکل ۱۳ آورده شده است.

برای اندازه‌گیری پتانسیل رمندهی مطابق با استاندارد ASTM نمونه



شکل ۱۴. نتایج آزمایش ادئومتر نمونه خاک استفاده شده

Fig. 14. Oedometer test results of used soil sample

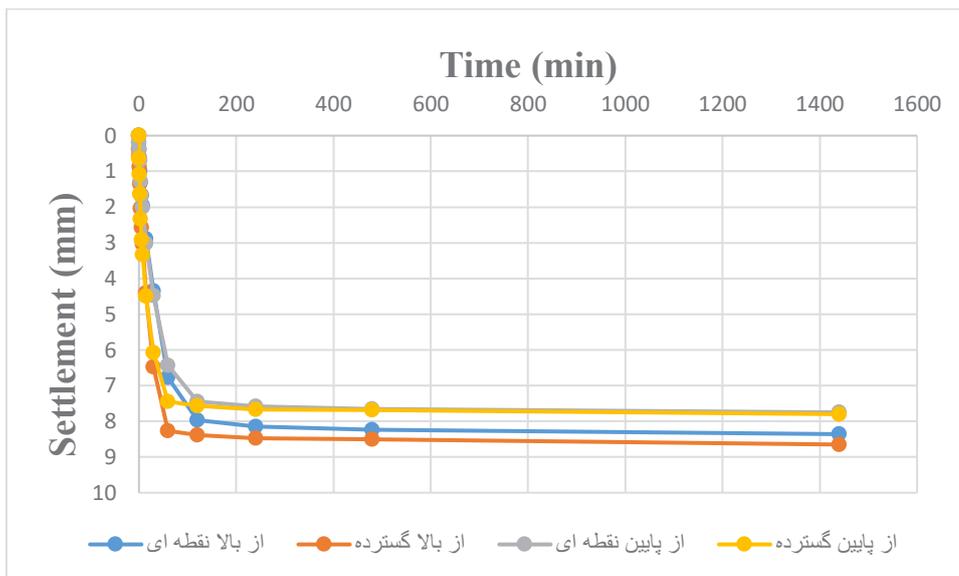


شکل ۱۵. نمودارهای تنش-نشست روش های مختلف نشست آب

Fig. 15. Stress-settlement diagrams of different water infiltration patterns

از شروع ورود آب به خاک میزان نشست خاک در زمان های مختلف تا ۲۴ ساعت بعد ثبت گردید. شکل ۱۵ نمودارهای تنش-نشست روش های مختلف نشست آب را نشان می دهد.

مشخصات بدون تغییر باقی ماند. در هر کدام از آزمایش ها نمونه ابتدا به صورت طبیعی تا فشار ۲۰۰ kPa بارگذاری گردید و پس از گذشت زمان یک ساعت، آب متناسب با نوع نفوذ همان آزمایش وارد خاک گردید. پس



شکل ۱۶. نمودارهای نشست - زمان روش های مختلف نشت آب

Fig. 16. Settlement-time diagrams of different water infiltration patterns

روش های مختلف نشت آب با پتانسیل رمبندگی آزمایش ادئومتر محاسبه گردید که در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

هدف از ساخت این دستگاه بررسی تاثیر نوع اشباع شدگی بر روی خاک های رمبند است. بر اساس نتایج به دست آمده برای خاک با مشخصات بالا در بین الگوهای مختلف نشت آب، بیشترین پتانسیل رمبندگی با مقدار $8/62$ مربوط به اشباع شدگی از بالا به پایین و به صورت گسترده است و کمترین آن مربوط به اشباع شدگی از پایین به بالا و به صورت نقطه ای با مقدار $7/80$ است.

پتانسیل رمبندگی به دست آمده از تمام آزمایش های با روش های مختلف نشت آب کمتر از پتانسیل رمبندگی آزمایش ادئومتر است. نتایج روش های اشباع شدگی از بالا به پایین اختلاف کمی با نتایج ادئومتر دارند اما این اختلاف برای روش های با اشباع شدگی از پایین به بالا بیشتر است و حدود $13-12\%$ با پتانسیل رمبندگی آزمایش ادئومتر اختلاف دارند.

این نتایج نشان می دهد پتانسیل رمبندگی وابسته به جهت جریان آب است و برای الگوهای با نشت آب از پایین به بالا حدود 10% کمتر از الگوهای با نشت آب از بالا به پایین است. در مقایسه نحوه توزیع نشت برای هر دو جهت حرکت، میزان پتانسیل رمبندگی برای روش های نقطه ای و گسترده مقادیر نزدیکی دارد و اختلاف نتایج ناچیز است.

یکی از کنترل هایی که در این آزمایش ها باید صورت گیرد، اشباع شدن کامل خاک قبل از زمان 24 ساعت است. در آزمایش های با حرکت آب از بالا به پایین می توان با مشاهده خروج آب از صفحه کف نمونه و در آزمایش های با حرکت آب از پایین به بالا می توان با مشاهده جمع شدن آب روی سطح نمونه از اشباع شدن خاک اطمینان پیدا کرد. که در این 4 آزمایش قبل از پایان زمان 24 ساعت، اشباع کامل خاک مشاهده گردید.

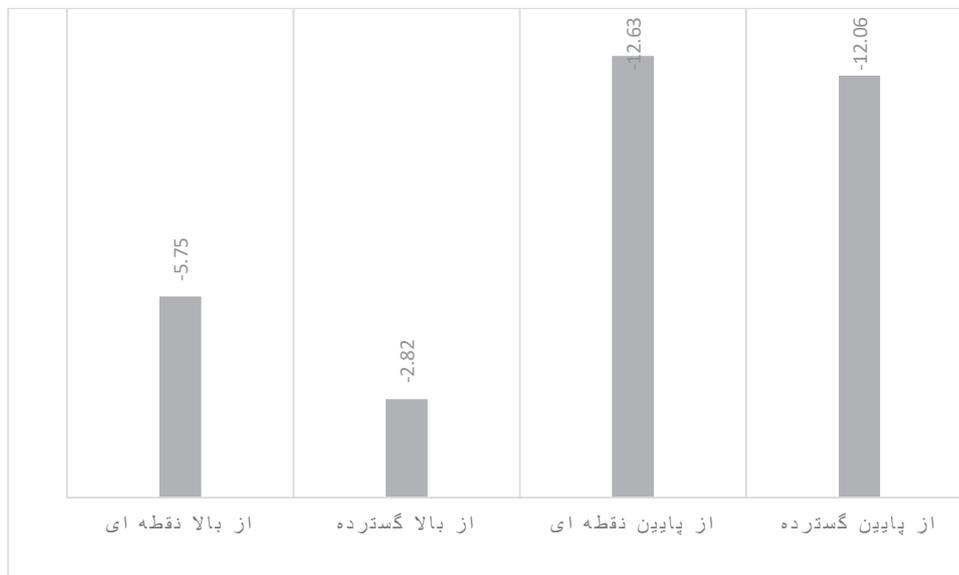
در این دستگاه میزان نشست در زمان های مختلف پس از شروع فرآیند اشباع کردن تا 24 ساعت پس از آن ثبت می گردد. با این نتایج می توان سرعت نشست ها را بررسی نمود. در شکل ۱۶ نمودارهای نشست - زمان بعد از شروع فرآیند اشباع کردن برای روش های مختلف نشت آب در خاک ارائه گردیده است.

با استفاده از نشست قبل از شروع فرآیند اشباع شدن و نشست بعد از گذشت زمان 24 می توان پتانسیل رمبندگی را برای هر آزمایش محاسبه نمود. که نتایج آزمایش های انجام شده در جدول ۳ ارائه گردیده است. از آنجا که پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش ادئومتر تک متداول ترین روش محاسبه پتانسیل رمبندگی است، نتایج این آزمایش برای مقایسه نتایج آزمایش های با قابلیت شبیه سازی نوع نشت آب به عنوان مبنا قرار گرفت و میزان درصد اختلاف پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش های با

جدول ۳. محاسبه پتانسیل رمبندگی آزمایش‌های با قابلیت شبیه‌سازی نشت آب

Table 3. Calculating the collapse potential of tests with the ability to simulate water infiltration

پتانسیل رمبندگی	ضخامت نمونه (mm)	نشست بعد از اشباع شدن (mm)	نشست قبل از اشباع شدن (mm)	روش اشباع شدن
۸/۳۶	۱۰۰	۲۷/۵۶	۱۹/۲۰	از بالا به صورت نقطه‌ای
۸/۶۲	۱۰۰	۲۸/۶۴	۲۰/۰۲	از بالا به صورت گسترده
۷/۷۵	۱۰۰	۲۸/۴۰	۲۰/۶۵	از پایین به صورت نقطه‌ای
۷/۸۰	۱۰۰	۲۸/۷۹	۲۰/۹۹	از پایین به صورت گسترده



شکل ۱۷. درصد اختلاف پتانسیل رمبندگی روش‌های مختلف نشت آب با آزمایش ادنومتر

Fig.17. The percentage of difference in collapse potential of different water infiltration patterns with oedometer test

ذکر این نکته قابل اهمیت است که نتایج به دست آمده برای نمونه خاک استفاده شده با مشخصات ذکر شده است و از آنجا که میزان پتانسیل رمبندگی وابسته به عوامل مختلف است، این نتایج قابل تعمیم به تمام خاک‌های رمبند نیست. هدف اصلی ساخت این دستگاه همین است که بتوان برای هر خاک رمبند با هر شرایطی میزان پتانسیل رمبندگی را پیش‌بینی نمود.

این مطالعه نشان می‌دهد که نوع نشت آب در خاک رمبند می‌تواند بر روی پتانسیل رمبندگی تاثیر بگذارد و نتایج به دست آمده از دستگاه‌های بدون قابلیت مدل‌سازی الگو نشت آب برای تعیین پتانسیل رمبندگی همراه با خطا است، بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر پتانسیل رمبندگی خاک محل یک پروژه، پیشنهاد می‌شود ابتدا بررسی گردد که در محل پروژه، محتمل‌ترین نوع الگو نشت آب در خاک چیست و بر اساس آن نمونه انتقال یافته به آزمایشگاه با همان الگو نشت آب مدل‌سازی گردد.

۶- نتیجه گیری

یک دستگاه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد که قابلیت شبیه سازی انواع الگو نشست آب در خاک را دارد. این دستگاه نحوه نشست آب بر اساس جهت حرکت آب (از بالا به پایین یا از پایین به بالا) و توزیع نشست (نقطه ای یا گسترده) به چهار دسته کلی تقسیم بندی و شبیه سازی می کند. از یک نمونه خاک رمبنده ساخته شده در آزمایشگاه استفاده گردید و پتانسیل رمبندگی به دست آمده از چهار الگو نشست آب و آزمایش ادنومتر متداول مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این مطالعه در ادامه آورده شده است:

آب می تواند از طریق منابع مختلفی همچون بارندگی، سیلاب، آبیاری درختان، نشست و شکست لوله های انتقال آب، بالا آمدن سطح آب زیر زمینی، نشست فاضلاب و ... وارد خاک رمبنده شود که نوع نشست آب می تواند بر روی نشست خاک رمبنده تاثیر بگذارد.

از آنجا که آزمایش های موجود برای پیش بینی پتانسیل رمبندگی، قابلیت مدل سازی نوع نشست آب را ندارند، نتایج آنها می تواند همراه با خطا باشد.

برای خاک رمبنده نمونه، مقدار پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش ادنومتر متداول با غرقاب کردن، بیشتر از مقادیر پتانسیل رمبندگی به دست آمده از آزمایش های با مدل سازی نوع نشست آب است. در روش های نشست آب از بالا به پایین اختلاف ناچیز است ولی در روش های نشست آب از پایین به بالا نتایج به دست آمده حدود ۱۳٪ کمتر از آزمایش ادنومتر است.

برای خاک رمبنده نمونه، بیشترین پتانسیل رمبندگی مربوط به زمانی است که آب از بالا و به صورت گسترده وارد خاک رمبنده شود و کمترین آن مربوط به نشست آب از پایین و به صورت نقطه ای است.

نتایج برای خاک رمبنده نمونه نشان می دهد که پتانسیل رمبندگی برای نشست آب از بالا به پایین بیشتر از نشست آب از پایین به بالا است و پتانسیل رمبندگی برای دو روش نقطه ای و گسترده نزدیک به هم است و اختلاف ناچیزی دارند.

شرایط هر خاک رمبنده می تواند بر روی پتانسیل رمبندگی آن تاثیر بگذارد، بنابراین برای پیش بینی دقیق تر پتانسیل رمبندگی باید تاثیر روش های نشست آب برای هر خاک به صورت جداگانه بررسی گردد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

پتانسیل رمبندگی	CP
تغییرات نسبت تخلخل	Δe
نسبت تخلخل اولیه	e_0
تغییرات ارتفاع، mm	Δh
ارتفاع اولیه، mm	h_0
پتانسیل رمبندگی	I_c
قرائت گیج بعد از خیس شدن، mm	d_f
قرائت گیج قبل از خیس شدن، mm	d_i
شاخص رمبندگی	I_e
تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد	N
آزمایش نفوذ استاندارد	SPT
آزمایش نفوذ مخروط	CPT
درصد رطوبت	ω
وزن مخصوص، kN/m^3	γ
وزن مخصوص خشک حداکثر، kN/m^3	$\gamma_{d,max}$
درصد رطوبت بهینه	ω_{opt}
چگالی ویژه	G_s
ضریب یکنواختی	C_u
ضریب دانه بندی	C_c
شرایط مرجع	*

منابع

- [1] J.K. Mitchell, K. Soga, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons New York, 2005.
- [2] V. Murthy, Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering, CRC press, 2002.
- [3] K.E. Gaaver, Geotechnical properties of Egyptian collapsible soils, Alexandria Engineering Journal, 51(3) (2012) 205-210.
- [4] C. Rogers, T. Dijkstra, I. Smalley, Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe: in memory of Jan Sajgalik, Engineering Geology, 37(2) (1994) 83-113.
- [5] M. Noutash, B. Hajjalilue, M. Cheshmdoost, Preponding of canals as a remediation method for collapsible soils, in: Proceedings of the 4th international conference on

- 25-40.
- [17] H.A. Alawaji, Leak Induced Settlement of Buried Pipelines in Collapsible Soil, in: Pipelines 2008: Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure, 2008, pp. 1-10.
- [18] R. Vandanapu, J.R. Omer, M.F. Attom, Laboratory simulation of irrigation-induced settlement of collapsible desert soils under constant surcharge, *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(6) (2017) 2827-2840.
- [19] M.A.-R. I.M Mashhour, A.M. Hanna, Effect of Rate of Inundation on Drag Load Acting on Single End-bearing Piles in Collapsible Soils, 10th Alexandria International Conference on Structural, Geotechnical Engineering and Management, (2019).
- [20] J. Jennings, A Guide To Construction On Or With Materials Exhibiting Additional Settlement Due To Collapse” Of Grain Structure, (1975).
- [21] E.C. Lawton, R.J. Fragaszy, J.H. Hardcastle, Collapse of compacted clayey sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(9) (1989) 1252-1267.
- [22] K.M. Rollins, R.L. Rollins, T.D. Smith, G.H. Beckwith, Identification and characterization of collapsible gravels, *Journal of geotechnical engineering*, 120(3) (1994) 528-542.
- [23] T. Ayadat, A. Hanna, Identification of collapsible soil using the fall cone apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, 30(4) (2007) 312-323.
- [24] A. D5333, Standard Test Methods for Measurement of Collapse Potential of Soils, in: ASTM D5333, Annual Book of ASTM Standards, 2003.
- [25] H.H. Mahmoud, W.N. Houston, S.L. Houston, Apparatus and procedure for an in situ collapse test, *Geotechnical Testing Journal*, 18(4) (1995) 431-440.
- [26] A. Hanna, S. Soliman, Experimental investigation of foundation on collapsible soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(11) (2017) 04017085.
- geotechnical engineering and soil mechanics, Tehran, Iran, 2010.
- [6] J. Yuan, Analysis of the influences for collapsibility of loess soils in China, *West-China Exploration Engineering*, 10 (2009) 31-34.
- [7] E.C. Lawton, Wetting-induced collapse in compacted soil, Washington State University, 1986.
- [8] E.C. Lawton, R.J. Fragaszy, M.D. Hetherington, Review of wetting-induced collapse in compacted soil, *Journal of geotechnical engineering*, 118(9) (1992) 1376-1394.
- [9] L. Steadman, Collapse settlement in compacted soils of variable fines content, Washington State University, 1987.
- [10] A.A. Basma, E.R. Tuncer, Evaluation and control of collapsible soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10) (1992) 1491-1504.
- [11] S. Houston, W. Houston, C. Lawrence, Collapsible soil engineering in highway infrastructure development, *Journal of Transportation Engineering*, 128(3) (2002) 295-300.
- [12] D. Kim, Y. Chung, N.Z. Siddiki, Y. Shin, J.R. Kim, Mechanical Characteristics of Indiana Loess Soils for Highway Embankments, 2008.
- [13] A. El Howayek, P.-T. Huang, R. Bisnett, M.C. Santagata, Identification and behavior of collapsible soils, Purdue University. Joint Transportation Research Program, 2011.
- [14] P. Li, S. Vanapalli, T. Li, Review of collapse triggering mechanism of collapsible soils due to wetting, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(2) (2016) 256-274.
- [15] T. Ayadat, Geotechnical Performance of Encapsulated and Stabilized Stone Columns in a Collapsible Soil, *International Journal of Geomechanics*, 22(6) (2022) 04022057.
- [16] S.M. Haeri, Hydro-mechanical behavior of collapsible soils in unsaturated soil mechanics context, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(1) (2016)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Mahmoudi, R. Pourhosseini, Large-scale Apparatus for Measurement of Collapse Potential of Soils with Simulating the Pattern of Water Infiltration Ability, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4809-4826.

DOI: [10.22060/ceej.2022.21524.7755](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21524.7755)

