

مطالعه‌ی آزمایشگاهی ضریب فشار جانبی مخلوط ماسه - بنتونیت غیراشباع در حالت سکون

محسن منقسم جهرمی (مربی)

بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرقان

محسن ازدری* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فسا

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۳)
دوری ۲-۳، شماره ۳، ص. ۳۲-۲۷

معمولاً مخلوط ماسه - بنتونیت به منزله‌ی پوشش اطراف مخازن دفع زباله‌های شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پوشش دارای طول زیاد و ضخامت کم است و بنابراین، رفتار اذئومتریک دارد. در این نوشتار، یک اذئومتر اصلاح شده برای تعیین ضریب فشار جانبی در حالت سکون خاک‌های آماسی اشباع و غیراشباع معرفی می‌شود. رینگ صلب دستگاه با حکاکی سه دیاگرام با قطر ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر اصلاح می‌شود. این دیاگرام‌ها با استفاده از فشار هیدرواستاتیک آب، که می‌توان آن را به تغییر شکل ایجاد شده در دیاگرام مرتبط کرد، کالیبره می‌شوند. روش ابتکاری جدیدی برای به دست آوردن پارامتر تنش مؤثر خاک غیراشباع با استفاده از رفتار تغییر حجمی آن، ارائه و ضریب فشار جانبی مخلوط ماسه - بنتونیت در حالت سکون و درگام‌های تنش مختلف تعیین می‌شود. در نهایت، تأثیر بارگذاری‌های هیدرولیکی در میزان فشار جانبی خاک مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: فشار جانبی خاک در حالت سکون، ماسه - بنتونیت، مکش، خاک غیراشباع.

monghasem@yahoo.com
ajdari@fasau.ac.ir

۱. مقدمه

در سال ۲۰۰۳، نیز تعدادی آزمایش سه‌محوری بر روی رس‌های آماسی که شبروانی‌های خاکی را تشکیل می‌دهند، انجام شد و همچنین پایداری شیب‌ها در هنگام بارش مورد بررسی قرار گرفت.^[۱] نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مکش، فشار پیش‌تحکیمی را افزایش می‌دهد. به علاوه، در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۴، به مطالعه‌ی مکانیسم هیدراتاسیون بر روی رس‌های تک ساختاری به‌وسیله‌ی اعمال مقدار مکش معین بر روی بنتونیت متراکم‌شده پرداخته شد.^[۲] براساس نتایج ارائه‌شده‌ی این پژوهش، قرارگیری مولکول‌های آب بین ذرات و کلوخه‌های رسی تابع مکش است.

همچنین پژوهشگران (۲۰۰۵) چندین آزمایش ترساز و خشک‌اندازی بر روی مخلوط متراکم‌شده‌ی ماسه - بنتونیت در شرایط اذئومتریک و تحت تنش‌های مختلف انجام دادند.^[۳] نتایج آنها نشان داد که بارگذاری هیدرولیکی باعث انقباض‌های تجمعی می‌شود که نسبت بیش‌تحکیمی را افزایش می‌دهد.

در پژوهش‌های دیگری نیز تأثیر روش ساخت نمونه در رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های آماسی مطالعه شد،^[۴] و نیز تغییر ساختار رس‌های آماسی در حین ترساز مورد بررسی قرار گرفت.^[۵] همچنین پژوهشگرانی در پژوهش‌های خود نشان دادند که فشار تورمی قائم بیش از فشار تورمی افقی است،^[۶] و نیز منحنی مشخصه‌ی آب - خاک و مقاومت برشی خاک‌های آماسی دو ساختاره را مطالعه

برای درک بهتر رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های آماسی، تاکنون مطالعات آزمایشگاهی زیادی صورت گرفته است. برخی از پژوهشگران از دستگاه سه‌محوری،^[۱] برخی دیگر از اذئومتر استفاده کرده‌اند.^[۲] پژوهشگرانی نیز نشان داده‌اند که تنش پیش‌تحکیمی کاملاً تحت تأثیر وزن مخصوص خاک است.^[۳] همچنین در پژوهش‌هایی در سال ۱۹۹۶، یک رابطه‌ی معکوس خطی بین درصد تورم و لگاریتم سربار گزارش شده است،^[۴] و نیز ریزساختارهای رس تحت آزمایش اسکن میکروسکوپی الکترونی، قبل و بعد از چرخه‌های تورم مطالعه شد،^[۵] و نتایج آزمایش‌های پژوهش مذکور نشان داد که به محض تورم، ذرات صفحه‌ی شکل رسی تمایل به افقی شدن دارند و این تغییرات، نیروی دافعه‌ی بین ذرات ایجاد می‌کنند که منجر به تورم می‌شود. همچنین هنگامی که مصالح تحت آزمایش‌های انقباض - تورم جزئی و کامل قرار می‌گیرند، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

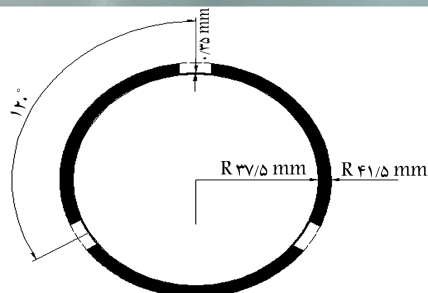
همچنین برخی پژوهشگران نشان داده‌اند که مسیر تورم خاک‌های منبسط‌شونده در فضای زمان - کرنش به شکل حرف S است.^[۶] به علاوه، در پژوهش‌هایی هم تأثیر روش تراکم در میزان تورم خاک‌های آماسی بررسی شده است.^[۷]

* نویسنده مسئول

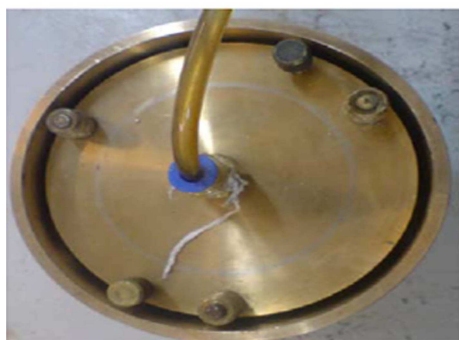
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۳۰، اصلاحیه ۲۴/۱۰/۱۳۹۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۱۲



شکل ۱. دستگاه ادنومتر، پمپ پرستالتیک و سیستم ثبت داده‌ها.



شکل ۲. رینگ اصلاح‌شده‌ی ادنومتر دیافراگمی اسموتیک.



شکل ۳. سرپوش مخصوص جهت کالیبره‌کردن رینگ ادنومتر.

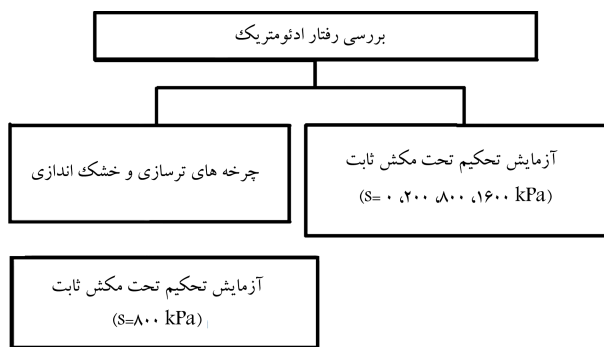
کردند و نشان دادند رفتار انشعابی و سخت‌شوندگی ناشی از مکش در مکش‌های بیش از مکش ورود هوای ریزحفره‌ها شروع می‌شود. [۱۹، ۱۸]

با وجود تحقیقات گسترده در مورد رفتار تغییر حجمی رس‌های متورم‌شونده، کم‌تر بر روی ضریب فشار جانبی در حالت سکون (K_0) این خاک‌ها پژوهشی صورت گرفته است. [۲۰] از جمله معدود تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه فعالیت آزمایشگاهی انجام‌شده توسط ویلار و ماچادو (۱۹۹۷) است که بر روی خاک شل ماسه‌ی رس‌دار و با استفاده از روش انتقال محوری برای اعمال مکش و در محدوده‌ی مکش‌های ناچیز انجام شده است. [۲۱] نتیجه‌ی این تحقیقات حاکی از کاهش ضریب فشار جانبی خاک با افزایش مکش است. همچنین، هیچ پژوهشی با هدف بررسی تأثیر چرخه‌های ترسازي - خشک‌اندازی در ضریب فوق انجام نشده است.

در این نوشتار، یک دستگاه ادنومتر دیافراگمی اسموتیک اصلاح‌شده برای مطالعه‌ی رفتار هیدرومکانیکی مخلوط مصنوعی ماسه - بتونیت تحت بارگذاری‌های هیدرولیکی و مکانیکی معرفی شده است. تنش مؤثر با استفاده از رفتار تغییرحجمی تعیین و ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون در مکش‌های مختلف محاسبه شده است و همچنین تأثیر بارگذاری هیدرولیکی و مقدار مکش در ضریب فوق مورد بحث قرار گرفته است.

۲. دستگاه ادنومتر دیافراگمی اسموتیک

شکل ۱، دستگاه ادنومتر استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای به‌دست‌آوردن K_0 ، ۳ دیافراگم دایره‌یی به قطر ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر بر روی رینگ ادنومتر حکاکی شده است و ۳ نشان‌گر تغییرشکل (LVDT) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و کورس ۲۵ میلی‌متر در تماس با دیافراگم‌ها و با هدف اندازه‌گیری تغییرشکل‌های افقی محدود آنها قرار گرفته است (شکل ۲). برای یافتن رابطه‌ی تغییرشکل افقی دیافراگم‌ها و فشار اعمال‌شده به جداری رینگ، یک سرپوش مخصوص طراحی و ساخته شد (شکل ۳). از طریق سرپوش مخصوص، فشارهای آب مختلف بر روی رینگ و دیافراگم‌ها اعمال و تغییرشکل‌های افقی حاصل اندازه‌گیری شد و رابطه‌ی بین فشار افقی و تغییرشکل دیافراگم‌ها به‌دست آمد. مقدار مکش دلخواه بر روی نمونه با استفاده از روش اسموتیک اعمال شده است. [۲۲] در این روش برای اعمال مکش از محلول پلی اتیلن گلیکول (PEG) استفاده می‌شود. یک پمپ پرستالتیک، محلول مذکور را به گردش در می‌آورد و محلول از میان پدستال مخصوص ادنومتر عبور می‌کند. پدستال طوری طراحی شده است که اجازه می‌دهد سیال در سرتاسر کف نمونه جریان یابد. برای جلوگیری از عبور مولکول‌های PEG به سمت نمونه، یک غشاء نیمه تراوا بین محلول PEG و نمونه‌ی خاک قرار می‌گیرد. روند اسموزی به این طریق است که آب از غشاء نیمه تراوا عبور می‌کند و مقدار مبادله‌ی آب وابسته به غلظت درشت‌مولکول‌هاست. در این روش میزان غلظت محلول PEG توسط رفراکتومتر دستی اندازه‌گیری می‌شود. در پژوهش‌هایی نیز در سال ۱۹۹۸، رابطه‌ی بین غلظت محلول، که توسط رفراکتومتر تعیین می‌شود، و مقدار مکش موجود در خاک، [۲۳] و همچنین در سال ۲۰۰۵، رابطه‌ی دقیق‌تر مکش و غلظت محلول PEG ارائه شده است. [۲۴] این روابط زمانی معتبر است که درجه‌ی حرارت در حدود $17.5 \pm 2^\circ\text{C}$ باشد. با استفاده از این نمودارها می‌توان نمودار منحنی مشخصه‌ی آب - خاک (SWCC) که رابطه‌ی بین درصد رطوبت و مکش را بیان می‌کند، را نیز به‌دست آورد. روش به‌دست‌آوردن این منحنی و نتایج در بخش‌های بعدی نوشتار ارائه می‌شود.



شکل ۵. روند انجام آزمایش‌های تحکیم (s مکش است).



شکل ۶. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در غشاء نیمه تراوا و محلول PEG.

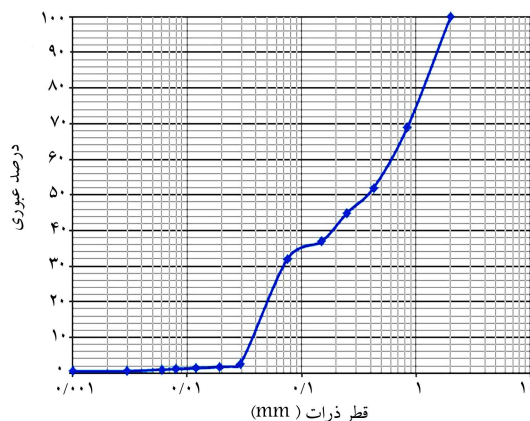
دانه‌بندی شده و ۲۵٪ بنتونیت تهیه شد و براساس درصد رطوبت همیشه (۲۰/۷۵٪)، به آن آب مقطر اضافه شد و در پاکت‌های سربسته تا زمانی که رطوبت همگن شود، نگهداری شد. برای به‌دست‌آوردن ۸ نقطه‌ی مشخص بر روی منحنی SWC (متناظر با مکش‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ کیلوپاسکال)، میزان PEG متناسب برای اعمال هر مکش موردنظر^[۲۴] درون ۸ ظرف در آب مقطر حل شد. سپس ۸ نمونه‌ی خاک با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر تهیه و درون غشاء نیمه تراوا به گونه‌ی پیچیده شد که وقتی نمونه‌ی درون غشاء در محلول PEG غوطه‌ور می‌شود، هیچ راه نفوذی برای محلول به درون غشاء وجود نداشته باشد. سپس نمونه‌های خاک درون غشاء نیمه تراوا، درون ظروف حاوی محلول PEG با غلظت‌های موردنظر قرار داده شد و سرپوش ظروف که کاملاً عایق هواست، بر روی ظروف قرار داده شد (شکل ۶). در این مرحله، ۱۴ روز به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به تعادل مکش برسند. سپس، نمونه‌ها با دقت زیاد از درون غشاء نیمه تراوا، به گونه‌ی خارج شدند که نمونه‌ی خاک هیچ‌گونه تماسی با محلول نداشته

۳. خاک مورد مطالعه و شرح آزمایش‌ها

مخلوطی از ۲۵٪ بنتونیت تجاری و ۷۵٪ ماسه‌ی خوب دانه‌بندی‌شده مورد مطالعه قرار گرفت. ماسه‌ی مورد استفاده شامل دانه‌های عبوری از الک شماره‌ی ۱۰ است. ماسه و بنتونیت به‌طور جداگانه و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵°C گرم‌خانه خشک شدند. چندین آزمایش براساس استاندارد ASTM (۱۹۹۵)^[۲۵] صورت گرفت تا مشخصات فیزیکی خاک مورد آزمایش تعیین شود. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. حدود اتربرگ مصالح، چگالی دانه‌های ماسه‌ی بنتونیت‌شده و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش پراکتور استاندارد در جدول ۱ نشان داده شده است.

نمونه‌های خاک با اختلاط درصد‌های مذکور از ماسه - بنتونیت با درصد رطوبت بهینه به‌طور مصنوعی آماده و در کیسه نگهداری شدند. همگن شدن مکش در ریزحفرات خاک منوط به گذشت زمان کافی است. بنابراین مصالح قبل از انجام آزمایش‌های مربوط، به مدت ۲ روز در کیسه‌های عایق هوا نگهداری شدند. خاک مورد مطالعه به‌صورت دینامیکی و در قالب پراکتور استاندارد و به منظور رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه متراکم شد. با توجه به تأثیر درصد رطوبت اولیه در ساختار خاک تمام نمونه‌ها در وزن مخصوص خشک بین ۱۶ تا ۱۶/۵ kN/m^۳ و در درصد رطوبت بین ۲۰ الی ۲۱ درصد تهیه شدند. برای انجام آزمایش‌های تحکیم و ترسازي - خشک‌اندازي، ۵ نمونه‌ی استوانه‌ی به قطر ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر تهیه شد. شکل ۵، روند آزمایش‌های تحکیم را نشان می‌دهد.

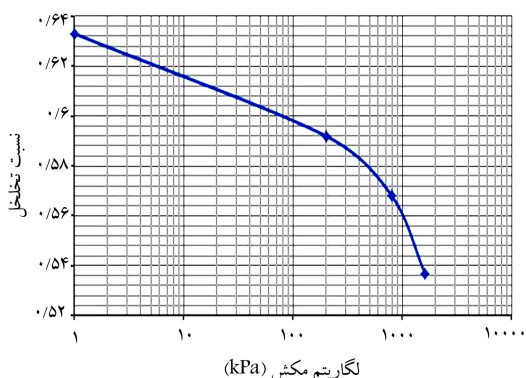
برای مطالعه‌ی رفتار هیدرومکانیکی یک محیط چند فازي مانند خاک‌های اشباع و غیراشباع، شناخت مشخصه‌های ماده ضروری است. پارامترهای منحنی مشخصه‌ی آب - خاک (SWCC) می‌توانند این مشخصه‌ها را در اختیار ما قرار دهند. برای به‌دست‌آوردن منحنی SWC، ابتدا نمونه‌ی خاک به نسبت ۷۵٪ ماسه‌ی خوب



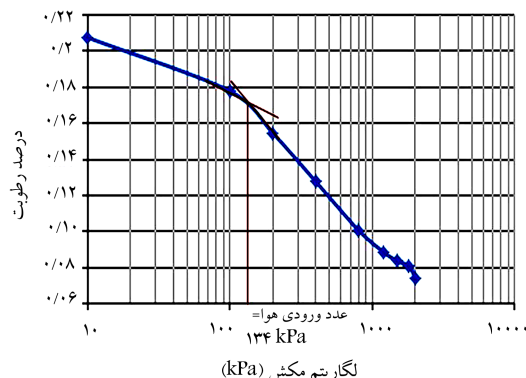
شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد آزمایش.

جدول ۱. مشخصات بنتونیت و مخلوط ماسه - بنتونیت مورد مطالعه.

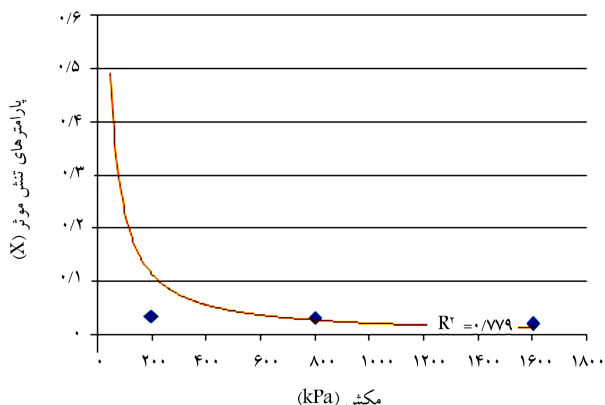
خاک	PI (%)	LL (%)	γ_d (kN/m ^۳)	ω_{opt} (%)	G_s
بنتونیت	۳۵	۱۱۱	-	-	-
مخلوط	۱۳/۴	۴۰/۴	۱۶/۵	۲۰/۷۵	۲/۷



شکل ۸. تغییرات نسبت تخلخل خاک با مکش.



شکل ۷. منحنی مشخصه آب - خاک مخلوط ماسه - بنتونیت.



شکل ۹. تغییرات پارامتر χ با مکش.

پارامتر تنش مؤثر در شرایط اشباع (مکش‌های کوچک‌تر از مکش ورود هوا) برابر با واحد است.^[۲۷] بنابراین، با استفاده از نتایج اعمال گام‌های متوالی مکش در معادله‌ی ۱ و شروع از حالت اشباع، تنها مجهول معادله‌ی ۱، پارامتر تنش مؤثر در مکش‌های بزرگ‌تر خواهد بود. روند مشابهی را در تعیین پارامتر تنش مؤثر در قسمت کشسان - خمیری خشک‌اندازی آزاد (شکل ۸) می‌توان استفاده کرد (در این حالت از ضریب فشردگی خاک، $C_c = 0.365$ ، به جای ضریب فشردگی مجدد استفاده می‌شود). شکل ۹، تغییرات پارامتر χ با مکش را نشان می‌دهد. هر چند پارامتر تنش مؤثر به دست آمده ظاهراً مقادیر کمی را نشان می‌دهد (شکل ۹)؛ اما با توجه به اینکه در مقادیر بالای مکش ضرب می‌شود، تنش مؤثر را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد و منجر به کاهش زیاد نسبت تخلخل می‌شود (شکل ۸).

مطابق قانون ارشمیدس فشار سیالات ایزوتروپیک است. بنابراین فشار هیدرواستاتیک قائم و افقی آب و هوا یکسان است و ضریب فشار جانبی زمین در حالت سکون به صورت «نسبت تنش افقی مؤثر به تنش قائم مؤثر» تعریف می‌شود. از طرف دیگر، برای مدل‌سازی رابطه‌ی غیرخطی تنش‌های افقی و عمودی از تعریف نموی این پارامتر باید استفاده شود. اندراوس و السهبی (۱۹۷۳)^[۲۸] ضریب فشار جانبی زمین در حال سکون (K_0)، را به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف کردند:

$$K_0 = \frac{\delta \sigma'_h}{\delta \sigma'_v} \quad (2)$$

که در آن، σ'_h تنش افقی مؤثر و σ'_v تنش قائم مؤثر است. شکل ۱۰، تغییرات پارامتر K_0 را با مکش نشان می‌دهد که مشابه نتایج کسب شده توسط ویلاو و ماچادو (۱۹۹۷)^[۲۹] برای ماسه‌ی رس‌دار و در محدوده‌ی مکش‌های کم است. این شکل را به این شرح می‌توان توضیح داد که در حالت اشباع، رس‌های

باشد. در ادامه، جرم ۸ نمونه، اندازه‌گیری و به مدت ۲۴ ساعت درون کوره و در دمای $105^\circ C$ قرار داده شدند و مجدداً جرم آنها اندازه‌گیری شد و درصد رطوبت هر نمونه‌ی خاک در هر مکش به دست آمد. در نهایت نمودار SWCC به دست آمده بر اساس رابطه‌ی مکش با درصد رطوبت به دست آمد (شکل ۷). مهم‌ترین پارامتر منحنی SWCC، مکش ورود هواست. مکش ورود هوا در خاک، کم‌ترین مکشی است که در آن، بزرگ‌ترین حفرات نما از آب خالی می‌شوند. به عبارت دیگر، مکش ورود هوا مرز بین حالت اشباع و غیراشباع را نشان می‌دهد. مکش ورود هوای نمونه‌ی خاک مورد مطالعه بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷ برابر با 134 kPa است.

در تمامی آزمایش‌های تحکیم انجام گرفته، در ابتدا به نمونه‌ی خاک اجازه داده شد تا در طی جریان سیال در زیر نمونه‌ی خاک و اعمال باری معادل ۱ کیلو پاسکال بر روی نمونه، به تعادل مکش برسد. تعادل مکش در این آزمایش‌ها هنگامی قطعی می‌شود که با گذشت زمان، هیچ‌گونه تغییر شکل عمودی قابل ملاحظه‌ی در نمونه مشاهده نشود. پس از به تعادل رسیدن مکش، نمونه‌ی خاک تحت تنش‌های سربار مختلف بر اساس آزمایش تحکیم (ASTM-D2435)^[۲۵] بارگذاری می‌شود. در این آزمایش، نمونه‌ی خاک با گام‌های متوالی تنش کل بارگذاری می‌شود. هر گام بارگذاری به مدت ۲۴ ساعت، نگه داشته می‌شود و در طی فرایند تحکیم، مقدار نشست و کرنش جانبی نمونه قرائت و از این اطلاعات برای تعیین ارتباط بین تنش قائم مؤثر و تنش افقی مؤثر استفاده می‌شود.

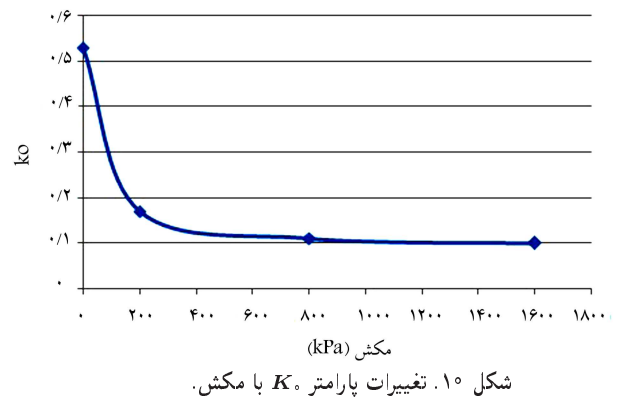
۴. نتایج در صفحه‌ی تنش مؤثر و محاسبه‌ی ضریب K_0

پارامتر تنش مؤثر را می‌توان به وسیله‌ی نتایج به دست آمده از خشک‌اندازی آزاد و آزمایش‌های تحکیم به دست آورد. تغییرات نسبت تخلخل در قسمت کشسان آزمایش خشک‌اندازی آزاد (تنش خالص ثابت صفر) از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\delta e = c_r \log\left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v1}}\right) \quad (1)$$

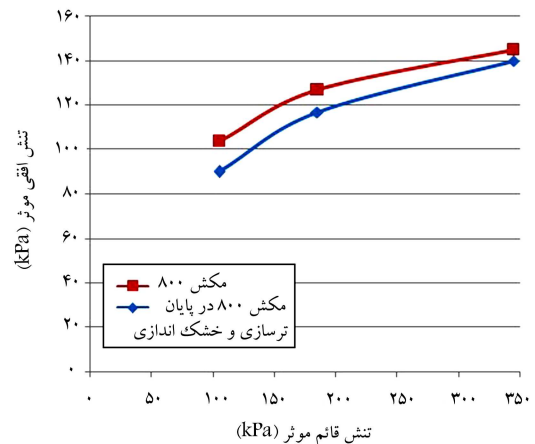
که در آن، e نسبت تخلخل، σ'_v تنش قائم مؤثر $\chi(S)$ پارامتر تنش مؤثر s مکش، و c_r ضریب فشردگی مجدد خاک است. همچنین خط تحکیم یک بعدی و خط تحکیم ایزوتروپیک (شکل ۸) را می‌توان با تقریب قابل قبولی، موازی هم فرض کرد.^[۲۶] بنابراین، شیب میانگین قسمت کشسان خط عادی تحکیم یافته، $c_r = 0.168$ در حالت ایزوتروپیک اشباع برای تعیین تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع به کار برده شد.

منبسط‌شونده رفتاری شبیه رفتار سیالات از خود نشان می‌دهند و در این حالت، پارامتر K_0 نزدیک به مقدار واحد است. افزایش مکش، نمونه را سخت می‌کند و پارامتر K_0 را کاهش می‌دهد. در مقادیر مکش میانی (۸۰۰ و ۱۶۰۰ کیلو پاسکال)، رفتار خاک شبیه یک بلوک سخت است و مقدار پارامتر K_0 بسیار کم است. همچنین فشار اعمالی افقی نمونه‌ی خاک در انتهای چرخه‌های ترساری و خشک‌اندازی نیز تعیین شد. شکل ۱۱، مقایسه‌ی فشار افقی خاک، قبل و بعد از ترساری و خشک‌اندازی را نشان می‌دهد. مشخص است که بارگذاری هیدرولیکی فشار جانبی خاک را کاهش می‌دهد و در نتیجه خاک، سخت‌تر می‌شود.



۵. نتیجه‌گیری

یک اذئومتر دیافراگمی اسموتیک جدید برای مطالعه‌ی رفتار مکانیکی مخلوط ماسه - بنتونیت غیراشباع طراحی و ساخته شد و ۳ دیافراگم دایره‌بی حکاکی‌شده بر روی رینگ دستگاه، به منظور تعیین ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون در مکش‌های مختلف کالیبره شد. دستگاه با موفقیت راه‌اندازی و به‌کار گرفته شد. آزمایش‌های تحکیم در مکش‌های ثابت دلخواه انجام شد. همچنین، چرخه‌های ترساری و خشک‌اندازی تحت تنش خالص بر روی نمونه‌ی متراکم‌شده اعمال شد و در پایان چرخه‌های هیدرولیکی، آزمایش تحکیم در مکش ثابت انجام شد و پارامتر تنش مؤثر خاک از رفتار تغییر حجمی آن به‌دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب K_0 به طور قابل توجهی با افزایش مکش کاهش می‌یابد. به‌علاوه، چرخه‌های ترساری - خشک‌اندازی سختی خاک را افزایش می‌دهد و باعث کاهش مقدار فشار افقی در نمونه‌ی خاک می‌شود.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی فشار افقی خاک، قبل و بعد از چرخه‌های ترساری - خشک‌اندازی در مکش (kPa) ۸۰۰.

منابع (References)

- Sharma, R.S. and Wheeler, S. "Behaviour of unsaturated highly expansive clay during cycles of wetting and drying", *Proceeding of Unsaturated Soils for Asia*, Singapore, pp. 727-730 (2000).
- Tripathy, S., Rao, K.S.S. and Fredlund, D.G. "Water content-void ratio swell-shrinkage paths of compacted expansive soils", *Can. Geotech. J.*, **39**(4), pp. 938-959 (2002).
- Subba Rao, K.S. "Swell-shrinkage behavior of expansive soils- geotechnical challenges", *Indian Geotechnical Journal*, **30**(1), pp. 1-68 (2000).
- Alonso, E.E., Lloret, A., Gens, A. and Yang, D.Q. "Experimental behaviour of highly expansive double- structure clay", *Proc. 1th Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Balkema. Paris, **1**, pp. 11-16 (1995).
- Shuai, F. "Simulation of the swelling pressure measurements of expansive soils", PhD Thesis, Saskatchewan, Canada (1996).
- Basma, A.A., Al-Homoud, A.S., Malkawi, A.I.H. and Al-Bashabsheh, M.A. "Swelling-shrinkage behaviour of natural expansive clays", *Applied Clay Science*, **11**(2-4), pp. 211-227 (1996).
- Day, R.W., *Geotechnical and Foundation Engineering Design and Construction*, McGraw-Hill Co., New York (1999).
- Lloret, A., Villar, M.V., Sa'nchez, M., Gens, A., Pintado, X. and Alonso, E.E. "Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes", *Geotechnique*, **53**(1), pp. 27-40 (2003).
- Attom, M.F., Abu-Zreig, M.M. and Obaidat, M.T. "Changes in clay swelling and shear Strength properties with different sample preparation techniques", *Geotechnical Testing Journal*, *GTJODJ*, **24**(2), pp. 157-163 (2001).
- Ferber, V., Auriol, J.C., Cui, Y.J. and Magnan, J.P. "On the swelling potential of compacted high plasticity clays", *Engineering Geology*, **104**(3-4), pp. 200-210 (2009).

11. Liangtong, Z. "Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain- induced slope instability", PhD Thesis, Hong Kong University (2003).
12. Saiyouri, N., Tessier, D. and Hicher, P.Y. "Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays", *Clay Minerals*, **39**(4), pp. 469-479 (2004).
13. Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and Garcia-Escudero, E. "Expansive bentonite-sand mixtures in cyclic controlled-suction drying and wetting", *Engineering Geology*, **81**(3), pp. 213-226 (2005).
14. Cuisinier, O. and Masrouri, F. "Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil over a wide suction range", *Engineering Geology*, **81**(3), pp. 204-212 (2005).
15. Nowamooz, H. and Masrouri, F., *Density-Dependent Hydromechanical Behaviour of a Compacted Expansive Soil: Experimental and Analytical Aspects*, Engineering Geology, In Press (2009).
16. Laird, D.A. "Influence of layer charge on swelling of smectites", *Applied Clay Science, Elsevier*, **34**(1-4), pp. 74-87 (2006).
17. Avsar, E., Ulusay, R. and Sonmez, H. "Assessments of swelling anisotropy of ankara clay", *Engineering Geology*, **105**(1-2), pp. 24-31 (2009).
18. Ajdari, M., Habibagahi, G., Nowamooz, H., Masrouri, F. and Ghahramani, A. "Shear strength behavior and water retention curve of a dual porosity silt-bentonite mixture", *Scientia Iranica*, **17**(6) pp. 430-440 (2010).
19. Ajdari, M., Habibagahi, G. and Ghahramani, A. "Predicting effective stress parameter of the soils using neural networks", *Computers and Geotechnics*, **40**, pp. 89-96 (2011).
20. Montanez, J.E.C. "Suction and volume changes of compacted sand-bentonite mixtures", Ph. D. Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine and University of London (2002).
21. Vilar, O.M. and Machado, S.L. "The influence of suction on lateral stress and on collapse of a non-saturated soil", *Recent Development in Soil and Pavement Mechanics*, Rotterdam, pp. 309-314 (1997).
22. Ajdari, M., Habibagahi, G., Nowamooz, H., Masrouri, F. and Ghahramani, A. "Hydro-mechanical response of expansive silt-bentonite mixture", *Proceedings of UNSAT2010, Alonso and Gens, Taylor and Francis*, Barcelona, pp. 175-180 (2010).
23. Delage, P., Howat, M.D. and Cui, Y.J. "The relationship between suction and the swelling properties in a heavily compacted swelling clay", *Engineering Geology*, **50**(1-2), pp. 31-48 (1998).
24. Boso, M., Tarantino, A. and Mongiovi, L. "A direct shear box improved with the osmotic technique", *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, A. Tarantino, E. Romero & , Y.J Cui, eds., *Proc. of an International Symposium*, Trento, pp. 85-90 (27-29 June 2005).
25. ASTM D 3425, *Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils*, Annual Book of ATSM Standards, ASTM International, Philadelphia, PA, **4.09**, pp. 154-159 (1996).
26. Atkinson, J.H. and Bransby, P.L., *The Mechanics of Soils, an Introduction to Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London (1978).
27. Khalili, N. and Khabbaz, M.H. "A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, **48**, pp. 1-7 (1998).
28. Andrawes, K.Z. and El-Sohby, M.A. "Factors affecting coefficient of earth pressure K₀", *J. ASCE*, **99**(7), pp. 527-539 (1973).