

اندازه‌گیری پیوسته‌ی درجه‌ی اشباع و مکش بافتی خاک‌های غیراشباع با استفاده از دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک

علی میرزایی* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه کاشان

محمد مرتضایی (دانشجوی دکتری)

سید ابوالحسن نائینی (استاد)

دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱ (درداشت فنی)
دردی ۲ - ۳۸، شماره ۲/۱، ص. ۱۰۹-۱۱۵، (یادداشت فنی)

در نوشتار حاضر، به بررسی عملکرد یک دستگاه جدید در بررسی تأثیر تراکم اولیه در اجزاء مختلف منحنی مشخصه‌ی آب - خاک یک خاک ماسه‌بی پرداخته شده است. در دستگاه جدید، تغییرات مکش بافتی در بازه‌های خشک‌شدگی به صورت مستقیم و پیوسته و بدون نیاز به افزایش مصنوعی فشار هوای حفره‌بی توسط حسگرهای جدید مینیاتوری مکش بافتی اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده حاکی از کارایی حسگرهای جدید مینیاتوری مکش بافتی برای اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی خاک در مدت زمان در حدود ۱ دقیقه و اندازه‌گیری کاملاً پیوسته‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک در طول چند روز است. صحت عملکرد دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک نیز با اندازه‌گیری مکش بافتی خاک در چند نقطه با استفاده از تسمیومترهای متداول بررسی شده است که نتایج به دست آمده حاکی از سازگاری مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری شده توسط هر دو روش است.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، درجه اشباع، مکش بافتی، اندازه‌گیری پیوسته، حسگرهای مینیاتوری مکش بافتی.

۱. مقدمه

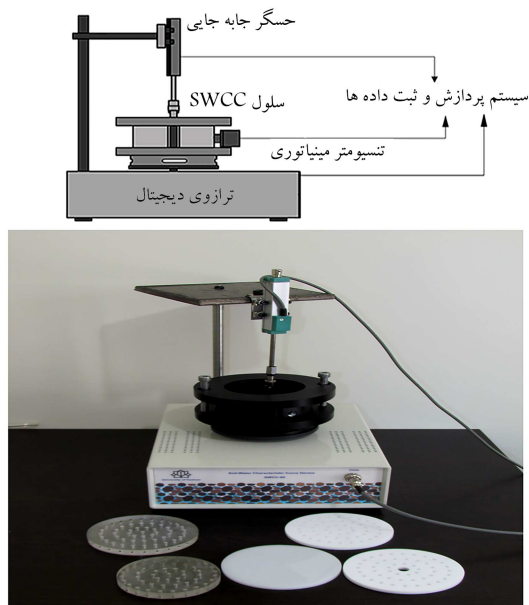
که فاقد املاح و نمک‌های محلول هستند، اهمیت مکش اسمزی بسیار کم و مقدار مکش کل تقریباً با مکش بافتی خاک برابر بوده است.^[۱] بیشتر روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری منحنی مشخصه، وابسته به روش‌های اندازه‌گیری مکش درون خاک است. با توجه به منفی بودن فشار آب حفره‌بی در خاک‌های غیراشباع، روش‌های مختلفی برای کنترل و بعضاً اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌ها تاکنون توسط پژوهشگران ابداع شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌های کنترل و یا اندازه‌گیری فشار آب حفره‌بی منفی در خاک‌های غیراشباع، افزایش مصنوعی فشار هوای درون حفره‌های خاک است، تا بتوان مقدار فشار آب حفره‌بی را از فاز منفی به مقادیر مثبت و قابل اندازه‌گیری منتقل کرد که اصطلاحاً به روش مذکور، «روش جابه‌جایی محوری»^[۲] اطلاق شده است.^[۱] اگرچه به واسطه‌ی عدم کارایی مناسب روش جابه‌جایی محوری برای اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی و نیز زمان‌بر بودن فرایند استفاده از آن، روش جابه‌جایی محوری عمدتاً برای کنترل مکش بافتی خاک‌ها توسط پژوهشگران مختلف استفاده شده است. با توجه به پیشرفت

رابطه‌ی بین تغییرات درجه اشباع و مکش، یکی از بنیادی‌ترین مفاهیم در حیطه‌ی مکانیک خاک‌های غیراشباع است که اصطلاحاً به آن منحنی مشخصه‌ی آب - خاک (SWRC)^[۱] اطلاق می‌شود. منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، در بیان بسیاری از جنبه‌های رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیراشباع، همچون: جریان، نفوذپذیری و یا مقاومت برشی خاک‌ها در بازه‌های مختلف رفتاری تر و یا خشک‌شدگی خاک کاربرد دارد.^[۱] یکی از پارامترهای اصلی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، مکش کل خاک است که برابر مجموع دو مقدار مکش بافتی و مکش اسمزی است. مکش بافتی خاک، تابعی از مقدار فشار آب حفره‌بی منفی درون خاک است و مقدار مکش اسمزی نیز وابسته به خواص شیمیایی خاک، مانند: املاح، کاتیون‌ها و نمک‌های محلول در خاک است. در بسیاری از خاک‌های مطالعه شده در پروژه‌های مهندسی

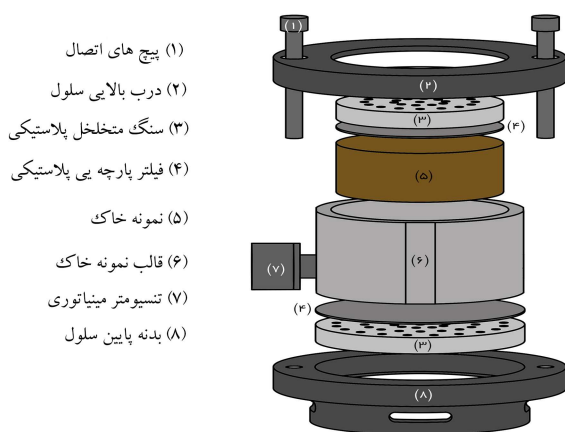
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۹/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۹.

DOI:10.24200/J30.2022.59333.3045



شکل ۱. شمای کلی دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک.



شکل ۲. اجزاء مختلف سلول جدید اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌ی آب - خاک.

از هر دو انتهای نمونه و نیز تعبیه‌ی همزمان آن بر روی سیستم توزین و اندازه‌گیری تغییرات درصد رطوبت خاک است. از جمله ویژگی‌های دیگر دستگاه اشاره شده نسبت به سایر دستگاه‌های ساخته شده، انتقال محل تعبیه‌ی تسنیمتر مینیاتوری از بالا و یا پایین نمونه‌ی خاک به جداری جانبی سلول و به صورت افقی است تا امکان زهکشی دوطرفه در حین فرایند خشک شدن نمونه‌ی خاک فراهم و مقدار مکش بافتی خاک نیز در وسط ارتفاع نمونه‌ی خاک (و یا سایر نقاط در ارتفاع خاک) اندازه‌گیری شود. برای کنترل سرعت خشک شدن نمونه‌ی خاک، سنگ‌های متخلخل پلاستیکی و نیز فیلترهای تراوای مصنوعی با قابلیت عدم جذب آب ساخته شده‌اند و در صورت لزوم و بسته به نوع خاک قابل تعبیه در بالا و پایین نمونه‌ی خاک هستند. از جمله ویژگی‌های دیگر دستگاه جدید نسبت به دستگاه‌های ساخته شده‌ی پیشین، امکان تعبیه‌ی همزمان سلول و تسنیمتر بر روی سیستم توزین نمونه‌ی خاک است که امکان اندازه‌گیری تغییرات درجه اشباع با دقت بهتر از ۰/۶٪ با مه‌ارساختن کابل رابط تسنیمتر و نیز استفاده از سیستم توزین با تعادل بالا فراهم شده است. همچنین نیاز استفاده از نمونه‌ی شاهد برای توزین تغییرات وزنی آب تبخیر شده مرتفع شده است.

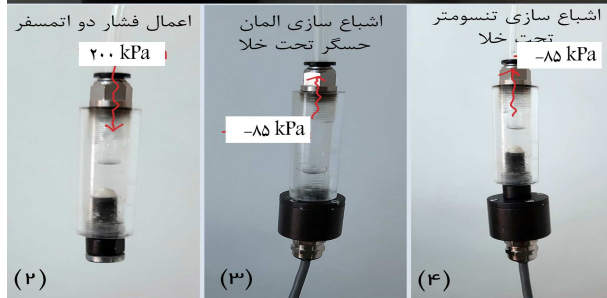
دستگاه‌های پژوهشی در سال‌های اخیر، عملکرد استفاده از روش جابه‌جایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌های غیراشباع نیز توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است که نتایج به دست آمده حاکی از دشواری‌های مرتبط با اندازه‌گیری مکش بافتی با استفاده از روش مذکور است.^[۳۲]

اولین تلاش‌ها برای اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی خاک توسط ریدلی (۱۹۹۳)،^[۳۱] باعث شد تا پتانسیل نیروی کشش سطحی بالای آب بدون هوا در اندازه‌گیری مکش بافتی در حسگر مکش بافتی پیشنهادی ریدلی و برلند^[۳۱] (۱۹۹۳)،^[۳۱] استفاده شود. در ادامه، تسنیمترهای مینیاتوری متعدد دیگری نیز توسط برخی پژوهشگران بر مبنای تسنیمتر ساخته شده‌ی ریدلی و برلند (۱۹۹۳)،^[۳۱] ساخته و عملکرد آن‌ها در اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌ها مطالعه شده است.^[۵-۱۱] ایده‌ی استفاده از تسنیمترهای مینیاتوری جدید برای اندازه‌گیری مستقیم منحنی مشخصه‌ی آب - خاک بر روی بازه‌ی خشک‌شدگی یک خاک رس ماسه‌دار توسط لورنکو^۴ و همکاران (۲۰۱۱)^[۱۲] استفاده شده است. در روش مذکور، تسنیمتر مینیاتوری بر روی سطح بالای نمونه‌ی خاک متصل و در حین فرایند خشک شدن نمونه‌ی خاک در هوای آزاد، تغییرات مکش بافتی خاک اندازه‌گیری شده است. فرایند اندازه‌گیری تغییرات درجه اشباع خاک در مرحله‌ی خشک‌شدگی نیز با تعبیه‌ی یک نمونه‌ی شاهد دیگر بر روی یک ترازو و اندازه‌گیری پیوسته‌ی تغییرات وزن نمونه‌ی خاک انجام شده است.^[۱۲] اخیراً صحت عملکرد استفاده از تسنیمترهای مینیاتوری برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌ی آب - خاک توسط پژوهشگران دیگری همچون سونگ^۵ و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۳] بر روی یک خاک رسی با حالت خمیری بالا و یا تولنار^۶ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۱۴] بر روی یک خاک رس با حالت خمیری بالا بررسی شده است.

با عنایت به مطالعات انجام شده‌ی پیشین در راستای اندازه‌گیری مستقیم پیوسته‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک با استفاده از تسنیمترهای مینیاتوری می‌توان به وجود مشکلاتی همچون شرایط تبخیر غیریکنواخت آب و خشک شدن نمونه‌ی خاک از یک طرف، نداشتن دقت کافی تسنیمترها در اندازه‌گیری منحنی مشخصه در خاک‌های ماسه‌یی، اندازه‌گیری غیرمستقیم تغییرات درجه اشباع با استفاده از نمونه‌های شاهد، عدم اندازه‌گیری تغییرات حجم نمونه‌ی خاک در حین خشک شدن و یا اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه در سطح خاک اشاره کرد. با توجه به مشکلات ذکر شده، در پژوهش حاضر عملکرد یک دستگاه جدید ساخته شده برای اندازه‌گیری پیوسته‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک با رفع عیوب اشاره شده در اندازه‌گیری رفتار منحنی مشخصه‌ی آب - خاک یک خاک ماسه‌یی پرداخته شده است.

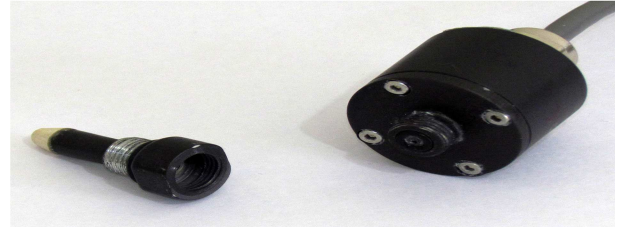
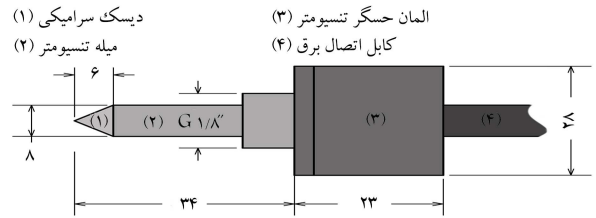
۲. دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک

در شکل ۱، شمای کلی دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی ساخته شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود که مطابق آن، دستگاه مذکور از بخش‌های مختلف: سلول نمونه‌ی خاک، تسنیمتر مینیاتوری جدید، سیستم اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه و ارتفاع خاک و نیز سیستم پردازش و ثبت اطلاعات تشکیل شده است. در شکل ۲، نیز اجزاء مختلف سلول اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌ی آب - خاک جدید مشاهده می‌شود که مطابق آن، سلول دستگاه به گونه‌یی ساخته شده است که امکان انجام آزمایش‌های مفروض بر روی نمونه‌های خاک به قطر ۸۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ الی ۵۰ میلی‌متر فراهم شود. از جمله ویژگی‌های اصلی سلول دستگاه نسبت به سایر دستگاه‌های ساخته شده در گذشته، امکان زهکشی و خشک شدن نمونه‌ی خاک



شکل ۴. فرایند اشباع سازی تنسیومتر.

تنسیومترهای مینیاتوری، تعبیه‌ی تنسیومتر درون یک محفظه‌ی بسته و پرکردن آن با آب بدون هواست و در ادامه، باید ابتدا فشار خلا به مدت چند ساعت در محفظه اعمال شود و سپس فشار درون مخزن تا مقدار $1/5$ الی 2 برابر عدد ورودی هوای دیسک سرامیکی تنسیومتر افزایش یابد و به مدت زمان دست‌کم 24 ساعت تا اشباع شدن کامل تنسیومتر ادامه یابد.^[۱۱-۳] در پژوهش حاضر، برای اشباع سازی تنسیومتر، ابتدا المان میله‌ی رابط تنسیومتر درون یک مخزن نیمه پر از آب بدون هوا غرقاب شده و به مدت دست‌کم 24 ساعت تحت اثر فشار خلا در حدود 85 کیلو پاسکال قرار گرفته است (شکل ۴). در مرحله دوم، میله‌ی رابط و دیسک سرامیکی نوک آن، درون محفظه‌ی اشباع سازی تعبیه شده است؛ و در ادامه، فشار 2 اتمسفر (حدوداً 2 برابر عدد ورودی هوای تنسیومتر) به بالای محفظه‌ی اشباع سازی اعمال شده است. سپس به مدت چند دقیقه اجازه داده شد تا آب از درون دیسک سرامیکی تنسیومتر عبور کند و از سمت انتهایی میله‌ی رابط تنسیومتر (محل اتصال به بخش المان حسگر فشار) خارج شود. همچنین سمت انتهایی میله‌ی رابط بسته شد و مجموعه‌ی میله‌ی رابط و دیسک سرامیکی به مدت زمان دست‌کم یک ساعت تحت اثر فشار 2 اتمسفر قرار گرفتند. در مرحله سوم، بخش المان حسگر تنسیومتر نیز به یک محفظه‌ی اشباع سازی نیمه پر از آب بدون هوا متصل و به مدت چند ساعت تحت فشار خلا واقع شد، تا مخزن المان حسگر کاملاً اشباع شود. بعد از اشباع مجزای میله‌ی رابط و المان حسگر تنسیومتر، بخش میله‌ی رابط و دیسک سرامیکی رو به پایین نگه داشته شد، تا فضای اتصال میله‌ی رابط به المان حسگر رو به بالا قرار گیرد و فضای اتصال میله‌ی رابط به المان حسگر از طریق جدااره‌ها و نوک و در نهایت، المان حسگر به میله‌ی رابط متصل شده است. در نهایت در مرحله چهارم، مجموعه‌ی کامل تنسیومتر، شامل: المان حسگر و میله‌ی رابط و دیسک سرامیکی درون محفظه‌ی اشباع سازی نیمه پر از آب بدون هوا تعبیه شده و به مدت چند ساعت تحت اثر فشار خلا قرار گرفته است. بعد از انجام آخرین مرحله‌ی



شکل ۳. اجزاء مختلف تنسیومتر مینیاتوری جدید.

در پژوهش حاضر، برای اندازه‌گیری مستقیم مکش بافتی خاک، تنسیومتر مینیاتوری جدید با جزئیات نشان داده شده در شکل ۳ طراحی و ساخته شده است. ایده‌ی اصلی طراحی و ساخت تنسیومتر جدید بر مبنای مشاهدات اولیه‌ی میرزایی و یشی (۲۰۱۲)^[۲]، و نیز استناد به مشاهدات برخی پژوهشگران^[۳-۵] و پتانسیل تحمل نیروهای کششی آب بدون هوا و اندازه‌گیری مستقیم فشار منفی آب حفره‌ی بوده است.

مطابق شکل ۳، تنسیومتر مینیاتوری جدید، شامل: دو بخش مجزای المان حسگر و میله‌ی تنسیومتر است. المان حسگر تنسیومتر به صورت سفارشی برای پژوهش حاضر توسط شرکت هولیکل ساخته شده است، تا امکان اندازه‌گیری نیروی کششی آب و به تبع آن فشار منفی آب حفره‌ی فراهم آید. بخش دیگر دستگاه نیز شامل میله‌ی رابط تنسیومتر است که یک دیسک سرامیکی در نوک آن تعبیه شده است که وظیفه‌ی آن ایجاد ارتباط با فشار آب حفره‌ی منفی خاک و انتقال فشار منفی حس شده به مخزن المان حسگر تنسیومتر و نهایتاً اندازه‌گیری فشار منفی آب حفره‌ی خاک توسط المان حسگر تنسیومتر است. وظیفه‌ی اصلی دیسک سرامیکی تعبیه شده بر روی نوک تنسیومتر، جلوگیری از ورود هوا به تنسیومتر در حین اندازه‌گیری مکش بافتی خاک است و عدد ورودی هوای دیسک استفاده شده باید از بیشینه‌ی مکش بافتی اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر بیشتر باشد. در پژوهش حاضر، با عنایت به نوع خاک استفاده شده (خاک ماسه‌ی) و افزایش سرعت عملکرد اندازه‌گیری مکش، از دیسک سرامیکی با عدد ورودی هوای یک اتمسفر در نوک تنسیومتر با جزئیات نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است. از جمله ویژگی‌های بارز تنسیومتر مینیاتوری ساخته شده‌ی جدید نسبت به سایر تنسیومترها تفکیک دو بخش المان حسگر و میله‌ی رابط از یکدیگر است (شکل ۳) که این امر باعث ایجاد امکاناتی همچون سهولت در فرایند اشباع سازی مجموعه‌ی تنسیومتر از آب بدون هوا، سهولت در تعویض میله‌ی رابط و دیسک سرامیکی در صورت شکسته شدن دیسک سرامیکی نوک تنسیومتر، امکان پیچ کردن تنسیومتر در جداری قالب نمونه و ایجاد پایداری لازم و نیز فرو رفتن تنسیومتر درون خاک در حدود 15 الی 20 میلی‌متر و تماس بهتر دیسک سرامیکی از طریق جدااره‌ها و نوک دیسک سرامیکی با خاک است. یکی از مهم‌ترین مراحل آماده سازی تنسیومترهای مینیاتوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک، اشباع سازی صحیح و کامل بخش‌های مختلف تنسیومتر از آب بدون هواست و روش‌های مختلفی توسط برخی پژوهشگران تاکنون بررسی شده‌اند.^[۱۱-۳] بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، مؤثرترین روش اشباع سازی

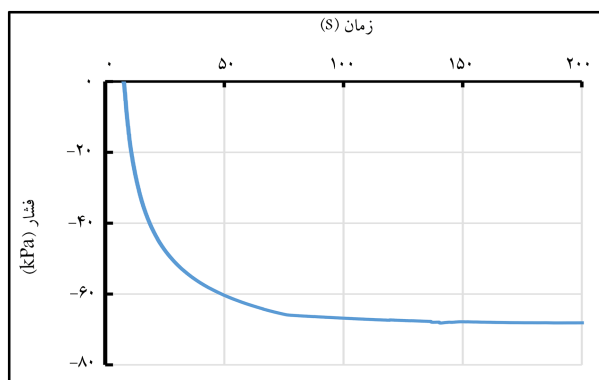
جدول ۱. مشخصات خاک مطالعه شده در پژوهش حاضر.

دانه‌های ریزتر از 0.425° میلی‌متر، %	۹۹
دانه‌های ریزتر از 0.15° میلی‌متر، %	۸
دانه‌های ریزتر از 0.075° میلی‌متر، %	$5 <$
ضریب یکنواختی، C_u	$1/25$
ضریب دانه‌بندی، C_c	$1/0$
نسبت تخلخل بیشینه، e_{max}	$0/9$
نسبت تخلخل کمینه، e_{min}	$0/6$
طبقه‌بندی (سیستم متحد)	SP

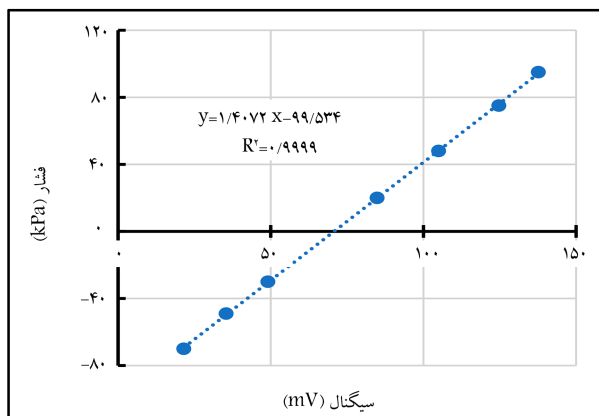
در جدول ۱ و از نوع ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) در سیستم طبقه‌بندی متحد بوده است. نمونه‌های خاک استفاده شده در پژوهش حاضر در سه تراکم مختلف متناظر با مقادیر نسبت تخلخل $0/6$ (متناظر با e_{min})، $0/9$ و $0/15$ (متناظر با e_{max}) به قطر 8° میلی‌متر و ارتفاع 3° میلی‌متر با رطوبت اولیه 15% درون قالب نمونه‌سازی دستگاه ساخته شده‌اند. برای اندازه‌گیری پیوسته بازه‌های خشک‌شدگی منحنی مشخصه، فرایند اشباع‌سازی اولیه‌ی نمونه‌ها با مستغرق ساختن آن‌ها درون آب انجام و مشاهده شد که مستغرق‌سازی نمونه‌ها در حدود 24 الی 48 ساعت برای اشباع‌سازی آن‌ها کافی بوده است. در ادامه، تنسیومتر اشباع شده در جداری سلول متصل شد و مجموعه‌ی سلول و تنسیومتر بر روی ترازوی دستگاه به نحو مطلوبی قرار گرفتند. برای کنترل سرعت خشک شدن خاک می‌توان از سنگ متخلخل‌های سوراخ‌دار پلاستیکی، فیلترهای پارچه‌ی پلاستیکی و یا ترکیب هر دو در دو انتهای نمونه‌ی خاک استفاده کرد. در پژوهش حاضر، با عنایت به عدم چسبندگی بین دانه‌ها در خاک و نیز سست بودن برخی از نمونه‌ها، از سنگ متخلخل در بالای نمونه و از ترکیب سنگ متخلخل و فیلتر پارچه‌ی پلاستیکی در پایین نمونه استفاده شده است. برای جلوگیری از تأثیر لرزش کابل‌های خروجی تنسیومتر و سایر حسگرهای دستگاه بر روی محاسبه‌ی میزان کاهش وزن نمونه و میزان تبخیر آب، تمامی کابل‌ها به میله‌ی رابط تعبیه شده در سیستم توزین دستگاه بسته شدند و مجموعه‌ی دستگاه در یک محیط بدون ارتعاش تا اتمام فرایند خشک‌شدگی خاک قرار گرفت.

تغییرات ارتفاع نمونه‌ی خاک نیز در حین فرایند خشک‌شدگی با استفاده از یک حسگر اندازه‌گیری تغییرمکان با دقت کمتر از $0/02^\circ$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد تا میزان تغییرات نسبت تخلخل خاک در طول فرایند خشک‌شدگی خاک و به تبع آن تغییرات درجه اشباع به صورت پیوسته اندازه‌گیری شود. در شکل‌های ۷ الی ۹، به ترتیب نمودار تغییرات ارتفاع نمونه‌ی خاک، نرخ تبخیر آب از نمونه‌ها، و تغییرات مکش بافتی در حین فرایند خشک‌شدگی نمونه‌های خاک بر حسب مقادیر مختلف نسبت تخلخل $0/6$ ، $0/75$ و $0/9$ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۸، فرایند خشک‌شدگی کامل نمونه‌ها بین ۵ تا ۷ روز و به صورت پیوسته تا خشک‌شدگی کامل نمونه‌های خاک انجام شده است. همچنین مطابق نتایج به‌دست آمده در شکل ۸ مشاهده می‌شود که نرخ تبخیر آب از نمونه‌های مختلف خاک در طول فرایند خشک‌شدگی ثابت و در حدود $0/45^\circ$ الی $0/58^\circ$ گرم بر ساعت بوده است که حاکی از شرایط زهکشی مناسب نمونه‌ها برای تبخیر آب از دو سمت نمونه‌های خاک بوده است.

همچنین مقادیر تبخیر آب از نمونه‌های خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی $0/6$ ، $0/75$ و $0/9$ به ترتیب برابر $54/3$ ، $64/5$ و $70/9$ گرم بوده است که با مقادیر محاسبه شده با توجه به روابط وزنی - حجمی و نیز میزان آب جذب شده



شکل ۵. نمودار پاسخ تنسیومتر مینیاتوری جدید.



شکل ۶. کالیبراسیون تنسیومتر مینیاتوری جدید.

اشباع‌سازی تنسیومتر، یک مقدار فشار خلاء مفروض درون محفظه‌ی اشباع‌سازی اعمال شد تا صحت عملکرد تنسیومتر در اندازه‌گیری فشار خلاء اعمال شده بررسی شود. در شکل ۵، نمودار عکس‌العمل تنسیومتر در اندازه‌گیری فشار خلاء اعمالی مشاهده می‌شود که بیانگر عکس‌العمل مناسب تنسیومتر مینیاتوری ساخته شده در اندازه‌گیری فشار 70° کیلوپاسکال و رسیدن به حالت پایداری در بازه‌ی حدوداً 10° ثانیه است که عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به تنسیومترهای مینیاتوری ساخته شده در گذشته همچون تنسیومترهای ساخته شده‌ی ریدلی و برلند (۱۹۹۳)^[۴] و یا لورنکو و همکاران (۲۰۰۸)^[۵] با زمان پاسخ در حدود ۵ دقیقه داشته است.

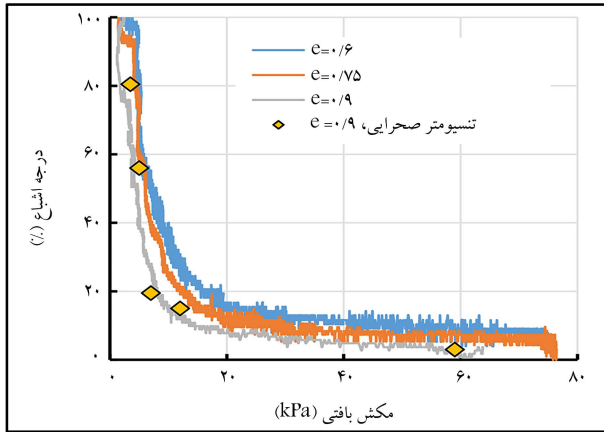
کالیبراسیون تنسیومتر ساخته شده نیز با استفاده از گیج فشار مرجع دقیق و در مجموعه‌ی فشارهای مشخص در بازه‌ی فشارهای مثبت تا مقدار 95° کیلوپاسکال و نیز مجموعه‌ی نقاط تا محدوده‌ی فشار 70° کیلوپاسکال انجام شده است که مطابق نتایج مندرج در شکل ۶، برای کالیبراسیون تنسیومتر مینیاتوری جدید ساخته شده حاکی از رابطه‌ی خطی و انحراف معیار کمتر از $1^\circ/0$ نسبت به مقادیر واقعی است.

۳. عملکرد دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک

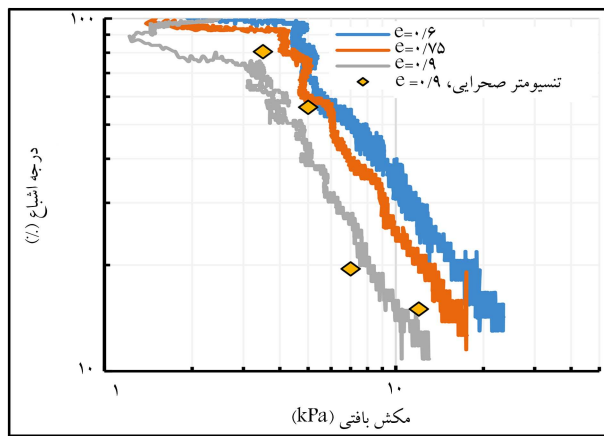
در راستای بررسی عملکرد دستگاه جدید منحنی مشخصه‌ی آب - خاک ساخته شده در پژوهش حاضر، مجموعه‌ی آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه بر روی بازه‌های خشک‌شدگی برای یک خاک ماسه‌ی انجام شده است. خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، یک خاک ماسه‌ی سیلیسی مطابق با مشخصات مندرج



شکل ۱۰. اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌ی خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی ۰/۹ در مسیر خشک‌شدگی با استفاده از تنسیومتر صحرایی.



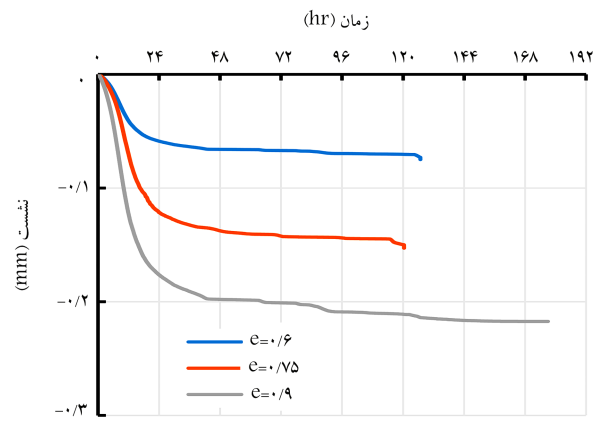
شکل ۱۱. منحنی مشخصه‌ی آب - خاک نمونه‌های خاک مطالعه شده.



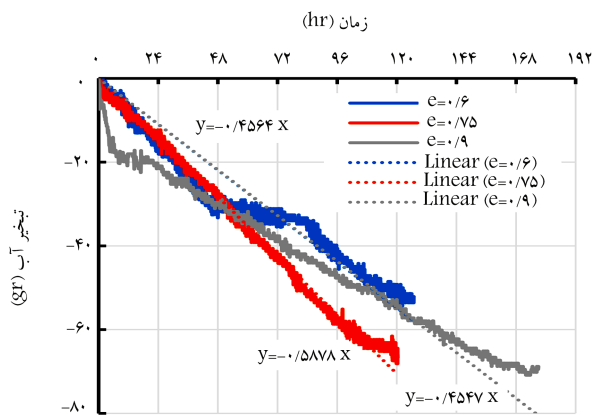
شکل ۱۲. تغییرات مکش بافتی و درجه اشباع نمونه‌های خاک مطالعه شده در مقیاس لگاریتمی.

بسته شد تا توزیع میزان رطوبت درون خاک متعادل شود و سپس مقدار مکش بافتی خاک با تعبیه‌ی تنسیومترهای متداول صحرایی درون نمونه، اندازه‌گیری شده است.

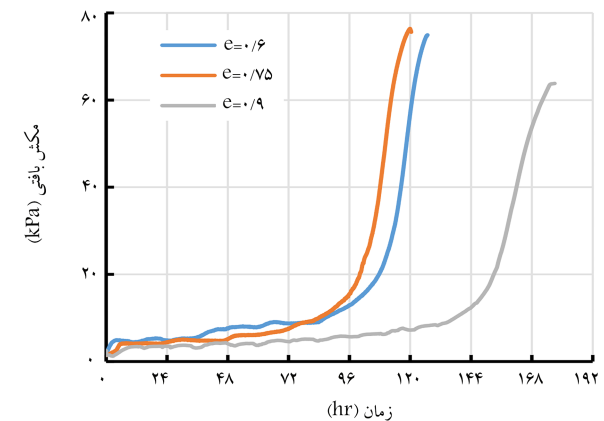
فرایند اخیر برای چند مرتبه تکرار و مکش بافتی خاک در مقادیر مختلف درصد رطوبت خاک در بازه‌ی خشک‌شدگی اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که بیانگر سازگاری منحنی‌های مشخصه‌ی آب - خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه جدید با مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری شده توسط تنسیومترهای متداول صحرایی است. همچنین خطای نسبی بین داده‌های



شکل ۷. تغییرات ارتفاع نمونه‌ها در حین فرایند خشک‌شدگی.



شکل ۸. نرخ تبخیر آب از نمونه‌ها در حین فرایند خشک‌شدگی.



شکل ۹. تغییرات مکش بافتی نمونه‌ها در حین فرایند خشک‌شدگی.

در حین فرایند اشباع‌سازی سازگاری مطلوبی دارد. برای راستی‌آزمایی عملکرد دستگاه منحنی مشخصه‌ی جدید، مقادیر مکش بافتی نمونه‌های خاک ساخته شده در نسبت تخلخل اولیه‌ی ۰/۹ نیز با استفاده از یک تنسیومتر متداول صحرایی در مقادیر مختلف درصد رطوبت اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰) که برای آن خاک مطالعه شده در پژوهش حاضر در یک ظرف بزرگ‌تر در نسبت تخلخل مفروض، متراکم و اشباع شد. در ادامه، به نمونه‌ی خاک اجازه داده شد تا از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در بالا و پایین مخزن به مدت زمان مشخصی در معرض هوا خشک شود. سپس درب بالا و پایین مخزن به مدت ۲۴ ساعت کاملاً

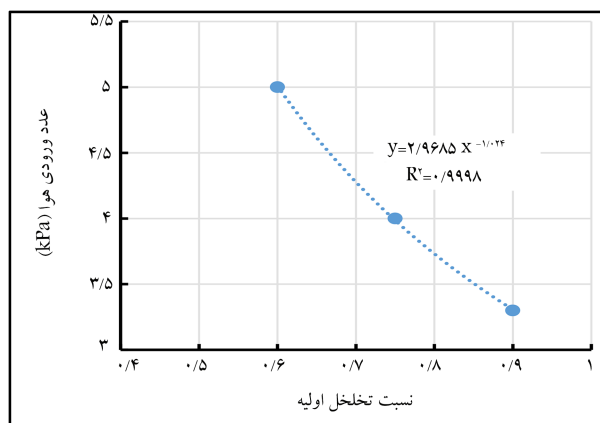
پژوهشگران با استفاده از محاسبه‌ی نقطه به نقطه‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک همچون آن جی و پانگ^۷ (۲۰۰۵)، فام^۸ و همکاران (۲۰۰۳)، ناث و لالوا^۹ (۲۰۰۸)، میرزایی و یشربی (۲۰۱۲)،^[۱] نیز حاکی از عدم وابستگی شیب منحنی مشخصه‌ی آب - خاک به تغییرات تراکمی خاک است که با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر سازگار است. میرزایی و یشربی (۲۰۱۲)، در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده نشان دادند که رابطه‌ی بین عدد ورودی هوا و نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک را می‌توان به صورت رابطه‌ی توانی برای خاک‌های مختلف بیان کرد. در پژوهش حاضر، بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، صحت رابطه‌ی توانی اشاره شده برای بیان تغییرات عدد ورودی هوای خاک بررسی شد و مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که تغییرات بین عدد ورودی هوا و نسبت تخلخل برای خاک مطالعه شده در پژوهش حاضر را می‌توان به نحو مطلوبی با استفاده از رابطه‌ی توانی بیان کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به معرفی یک دستگاه جدید برای اندازه‌گیری پیوسته‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک پرداخته و عملکرد آن در بررسی تأثیر تراکم اولیه در منحنی مشخصه‌ی آب - خاک یک خاک ماسه‌ی بررسی شده است. در دستگاه جدید، مقادیر مکش بافتی خاک با استفاده از یک حسگر تنسیومتر مینیاتوری جدید به صورت کاملاً پیوسته و نیز تغییرات درجه‌ی اشباع نمونه با استفاده از توزین پیوسته نمونه‌ی خاک در حین خشک شدن اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج به دست آمده حاکی از زمان عکس‌العمل سریع تنسیومتر مینیاتوری جدید (در حدود یک دقیقه) در اندازه‌گیری مکش بافتی خاک است که باعث شده است تا بتوان منحنی مشخصه‌ی آب - خاک را به صورت کاملاً پیوسته اندازه‌گیری کرد. صحت عملکرد تنسیومترهای مینیاتوری جدید نیز با اندازه‌گیری گسسته‌ی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک یکی از نمونه‌ها توسط تنسیومترهای متداول صحرایی بررسی شده است. همچنین با استفاده از دستگاه جدید، مجموعه‌ی آزمایش‌های SWCC بر روی یک خاک ماسه‌ی در مقادیر مختلف نسبت تخلخل انجام پذیرفت تا تأثیر تراکم اولیه‌ی خاک در پارامترهای مختلف منحنی مشخصه‌ی آب - خاک بررسی شود. مطابق نتایج به دست آمده مشاهده شد که شیب منحنی مشخصه‌ی آب - خاک مستقل از تغییرات تراکم اولیه‌ی نمونه‌ی خاک بوده است. همچنین مشخص شد که عدد ورودی هوای خاک، تابعی از تراکم اولیه خاک است و تغییرات آن را می‌توان به صورت تابعی توانی بر حسب نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک بیان کرد.

پانوشتها

1. soil-water retention curve (SWRC)
2. Axis-translation technique
3. Ridley & Burland
4. Lourenco
5. song
6. Tollenaar
7. Ng & Pang



شکل ۱۳. تغییرات عدد ورودی هوا و نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک.

اندازه‌گیری شده توسط تنسیومترهای متداول صحرایی و مینیاتوری، برابر با ۱/۴٪ برای مقادیر مختلف درجه‌ی اشباع بوده است.

۴. نتایج

بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، در شکل ۱۱، منحنی مشخصه‌ی آب - خاک نمونه‌های آزمایش شده در تراکم‌های مختلف بر حسب تغییرات مکش بافتی در برابر درجه اشباع مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش تراکم خاک، منحنی مشخصه‌ی آب - خاک به سمت بالا جابه‌جا شده و در نمونه‌های خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی ۰/۶ متناظر با متراکم‌ترین حالت در بالاترین وضعیت قرار گرفته‌اند. برای بررسی بیشتر اجزاء منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، مانند شیب منحنی‌های خشک‌شدگی و نیز عدد ورودی هوا (S_{ae})، مطابق روند پیشنهادی توسط میرزایی و یشربی (۲۰۱۲)،^[۱] منحنی مشخصه‌ی آب - خاک در مقیاس لگاریتمی برای مکش بافتی و درجه اشباع در شکل ۱۲ ترسیم شده است که مطابق آن، مقادیر شیب منحنی خشک‌شدگی مشخصه‌ی آب - خاک برای نمونه‌های خاک آزمایش شده با نسبت‌های تخلخل اولیه‌ی ۰/۶، ۰/۷۵ و ۰/۹ به ترتیب برابر ۱/۱۴، ۱/۱۸ و ۱/۳۵ - محاسبه شده‌اند. بر پایه‌ی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که افزایش تراکم نمونه‌ها، تأثیر چندانی در شیب مسیر خشک‌شدگی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک نداشته و تقریباً شیب آن‌ها در تمامی مقادیر نسبت تخلخل آزمایش شده با یکدیگر برابر بوده است. نتایج به دست آمده توسط سایر

8. Pham
9. Nuth & Laloui

منابع (References)

1. Fredlund, D. and Rahardjo, H. "Soil mechanics for unsaturated soils", New York, John Wiley & Sons Inc. (1993).

2. and Yasrobi, S. Mirzaii, A. "Influence of initial dry density on soil-water characteristics of two compacted soils", *Geotechnique letters*, **2**(4), pp. 193-198 (2012).
3. Ridley, A. and Burland, J. "A new instrument for the measurement of soil moisture suction", *Geotechnique*, **43**(2), pp. 321-324 (1993).
4. Ridley, A. "The measurement of soil moisture suction, London, Imperial College (1993).
5. Lourenco, S., Gallipoli, D., Toll, D. and et al. "Calibrations of a high-suction tensiometer", *Geotechnique*, **58**(8), 659-668 (2008).
6. Mendes, J.; Gallipoli, D.; Tarantino, A. and et al. "On the development of an Ultra-High Capacity Tensiometer capable of measuring water tensions to 7 MPa", *Geotechnique*, **69**(6), pp. 560-564 (2019).
7. Tarantino, A. and Mongiovi, L. "Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction", *Geotechnique*, **53**, pp. 137-141 (2003).
8. Mendes, J. and Gallipoli, D. "Comparison of high capacity tensiometer designs for long-term suction measurements", *Physics and Chemistry of the Earth*, **115**, pp. 102831 (2020).
9. Cui, Y.J., Tang, A., Mantho, A. and et al. "Monitoring field soil suction using a miniature tensiometer", *Geotechnical Testing Journal*, **31**(1), pp. 95-100 (2008).
10. Meilani, I. Rahardjo, H., Leong, E.C. and et al. "Mini suction probe for matric suction measurements", *Canadian Geotechnical Journal*, **39**, pp. 1427-1432 (2002).
11. Mendes, J. and Buzzi, O. "Performance of the University of Newcastle high capacity tensiometers", *Proc. 6th Int. Conf. on Unsaturated soils*, Sydney, Australia, pp. 1611-1616 (2014).
12. Lourenco, S., Gallipoli, D., Toll, D. and et al. "A new procedure for the determination of soil-water retention curves by continuous drying using high-suction tensiometers", *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(2), pp. 327-335 (2011).
13. Song, W., Cui, Y., Tang, A. and et al. "Experimental study on water evaporation from compacted clay using environmental chamber", *Canadian Geotechnical Journal*, **53**(8), pp. 1293-1304 (2016).
14. Tollenaar, R., van Passeen, L. and Jommi, C. "Small-scale evaporation tests on clay: Influence of drying rate on clayey soil layer", *Canadian Geotechnical Journal*, **55**(3), pp. 437-445 (2018).
15. Ng, C.W.W. and Pang, Y.W. "Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil", *Canad. Geotech. J.*, **37**(6), pp. 1252-1264 (2000).
16. Pham, H.Q., Fredlund, D.G. and Barbour, S. "A practical hysteresis model for the soil-water characteristic curve for soils with negligible volume change", *Geotechnique*, **53**(2), pp. 293-298 (2003).
17. Nuth, M. and Laloui, L. "Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils", *Comput. Geotech*, **35**(6), pp. 835-844 (2008).