

# اندازه‌گیری مکش بافتی اولیه‌ی خاک‌های متراکم‌شده بر روی بازه‌ی ترشدگی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک با استفاده از روش جابجایی محوری

علی میرزایی (استادیار)

دانشکده‌ی هندی، دانشگاه کاشان

سید شهاب‌الدین یثربی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

ناصر خلیلی (استاد)

دانشکده‌ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه نیو ساوت ویلز

مهندسی عمران شریف، (زمستان ۱۳۹۲)  
دوری ۲ - ۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۱۳۷-۱۴۳، (پادداشت‌نوی)

در این نوشتار به بررسی کارایی استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی اولیه‌ی گونه‌های مختلفی از نمونه‌های خاک متراکم‌شده‌ی ماسه، لای، و رس پرداخته شده است. تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده به گونه‌ی بود تا از رخداد بسیاری از عوامل خطای متداول در این روش جلوگیری شود. نمونه‌های خاک با استفاده از روش تراکم استاتیکی در مقادیر مختلف نسبت تخلخل متراکم و مکش بافتی اولیه‌ی آن‌ها با استفاده از روش جابجایی محوری و همچنین بازه‌ی ترشدگی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌های خاک نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده حاکی از سازگاری مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری شده با منحنی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌ها بوده است.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، تراکم‌پذیری، اندازه‌گیری مکش بافتی، روش جابجایی محوری، منحنی مشخصه‌ی آب-خاک.

## ۱. مقدمه

پیشینه‌ی فشار هوایی است که سنگ متخلخل سرامیکی در حالت اشباع کامل از آب نسبت به هوا ناتراواست. با توجه به محلول بودن نمک‌ها و املاح خاک درون آب و امکان تروش آن‌ها به همراه آب از درون سطح تداخل، روش جابجایی محوری فقط بیان‌گر مکش بافتی درون خاک است.

اگرچه روش جابجایی محوری عمدتاً برای کنترل مکش بافتی خاک در انجام آزمایش‌های مختلف بر روی خاک‌های غیراشباع استفاده شده است. در این روش متداول است تا فشار هوای درون حفره‌های خاک به صورت مصنوعی از مقدار فشار اتمسفریک افزایش یابد و در صورت فرض بر تراکم‌ناپذیری دانه‌های جامد خاک و آب درون حفره‌ها، مقدار فشار آب حفره‌ی منفی خاک نیز باید به مقدار مساوی افزایش یابد. برخی از پژوهشگران نیز برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌های مختلف از این روش استفاده کرده‌اند.<sup>[۱-۶]</sup>

اگرچه وجود مشکلاتی همچون طولانی بودن مدت زمان اندازه‌گیری، تبخیر آب درون حفره‌های خاک، جمع شدن حباب‌های هوا در مجاری اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی، امکان تغییر شکل خاک به واسطه‌ی افزایش فشار هوای حفره‌ی، امکان جابجایی آب درون حفره‌های خاک و تغییر در نحوه‌ی توزیع آب درون حفره‌های خاک به واسطه‌ی افزایش فشار هوا و نحوه‌ی تماس بین نمونه‌ی خاک و سطح تداخل باعث عدم تمایل پژوهشگران در استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش

دانستن مقدار مکش خاک در شناخت و بررسی جنبه‌های مختلف رفتار خاک‌های غیراشباع بسیار مهم است. مکانیک خاک‌های غیراشباع نیز به واسطه‌ی دشواری در اندازه‌گیری و یا کنترل مطلوب مکش در مقایسه با اندازه‌گیری و یا کنترل فشار آب حفره‌ی مثبت خاک‌های اشباع رشد بسیار کمتری داشته است.

تلاش‌های مکرر پژوهشگران برای شناخت جنبه‌های مختلف رفتاری خاک‌های غیراشباع باعث به وجود آمدن روش‌های مختلف برای کنترل و یا حتی اندازه‌گیری مکش خاک همچون روش جابجایی محوری، روش اسمزی و یا روش‌های کنترل رطوبت نسبی شده است، که جزئیات این روش‌ها و مقایسه‌ی بین آن‌ها در منابع مختلف اشاره شده است.<sup>[۱-۳]</sup>

یکی از متداول‌ترین روش‌های کنترل مکش در خاک‌های غیراشباع روش جابجایی محوری است. پیدایش این روش در سال‌های ۱۹۴۱ و ۱۹۵۶ برای خارج کردن آب درون حفره‌های خاک آغاز شد.<sup>[۴]</sup> در این روش مکش خاک توسط انتقال فاز آب از درون یک سطح تداخل تراوا به آب و ناتراوا به هوا اندازه‌گیری می‌شود. استفاده از سنگ‌های متخلخل سرامیکی با عدد عبوری هوای معین به منزله‌ی سطح تداخل نیمه تراوا متداول است. عدد عبوری هوای این سنگ‌های متخلخل بیان‌گر

\* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۶/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۱/۲/۱۲، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۲۴.

ali.mirzaii@kashanu.ac.ir  
yasrobis@modares.ac.ir  
n.khalili@unsw.edu.au

بافتی خاک شده است. از جمله مشکلات اصلی استفاده از روش جابجایی محوری در اندازه‌گیری مکش بافتی خاک مدت زمان طولانی استفاده از این روش است که تابع عوامل مختلفی همچون: ابعاد نمونه‌ی خاک، ضریب نفوذپذیری آب در خاک، ضریب نفوذپذیری سطح تداخل (سنگ‌های سرامیکی) نسبت به آب، ضخامت سطح تداخل، درجه‌ی اشباع، و مقدار مکش بافتی خاک است و بسته به عوامل مذکور، مدت زمان‌های بیش از چندین روز نیز توسط برخی پژوهشگران مشاهده شده است.<sup>[۱۱]</sup> به علت طولانی بودن مدت زمان اندازه‌گیری مکش بافتی با استفاده از روش جابجایی محوری امکان تبخیر آب درون حفره‌های خاک وجود دارد که توسط پژوهشگران مختلف مشاهده شده است.<sup>[۱۲]</sup> افزایش فشار هوای درون حفره‌های خاک که عمدتاً توسط واردکردن هوا با یک فشار مفروض به درون خاک انجام گرفته است نیز می‌تواند باعث جذب و کاهش رطوبت درون حفره‌های خاک شود.

همچنین هوا می‌تواند درون آب حل شود و از درون سطح تداخل ناتراوا به هوا نیز عبور کند و وارد مجاری اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی خاک شود. این امر تابعی از میزان ناتراوایی سطح تداخل نسبت به هوا (فرضاً عدد عبوری هوای سنگ‌های سرامیکی)، ضخامت سطح تداخل نیمه تراوا و مقدار مکش بافتی خاک است.<sup>[۱۳]</sup> و در محدوده‌ی فشارهای پایین آب (نزدیک و یا کمتر از فشار اتمسفر) امکان آزاد شدن هوای حل‌شده‌ی درون آب در مجاری اندازه‌گیری و کاهش دقت اندازه‌گیری مکش بافتی وجود خواهد داشت.

از جمله مشکلات دیگر امکان تغییر شکل و کاهش حجم نمونه‌ی خاک در حین افزایش فشار هوای حفره‌ی است که در بیشتر دستگاه‌های ابتدایی مورد استفاده برای این امر مشاهده شده است.<sup>[۷-۱۰]</sup> که در این حالت امکان اندازه‌گیری مکش بافتی خاک در یک وضعیت تراکم مشخص وجود نخواهد داشت.

در اغلب دستگاه‌ها افزایش فشار هوای حفره‌ی نمونه‌ی خاک عمدتاً از سمت بالای آن انجام می‌پذیرد و تغییرات فشار آب حفره‌ی خاک در سمت پایین نمونه‌ی خاک اندازه‌گیری می‌شود. این امر می‌تواند باعث جابجاشدن آب درون حفره‌های بالای نمونه به سمت حفره‌های پایین نمونه‌ی خاک و تغییر توزیع درصد رطوبت و مکش بافتی در توده‌ی نمونه‌ی خاک شود.

تماس مطلوب بین سطح نمونه‌ی خاک و سطح تداخل نیمه تراوا نیز در استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک بسیار مؤثر است. این امر به ویژه در خاک‌های دانه‌ی بسیار حائز اهمیت است که به واسطه‌ی عدم تماس کامل نمونه‌ی خاک با سطح تداخل امکان اندازه‌گیری فشار هوای افزایش‌یافته‌ی درون حفره‌های خاک به جای فشار آب حفره‌ی درون خاک وجود دارد.

در این نوشتار به بررسی کارایی استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی در گونه‌های مختلف خاک‌های متراکم‌شده‌ی ماسه، لای و رس پرداخته شده است. تجهیزات مورد استفاده و روند انجام آزمایش‌ها به گونه‌ی بود که رخداد عوامل خطای اشاره‌شده کاهش یابند. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و نتایج به دست آمده شرح داده شده‌اند. همچنین منحنی مشخصه‌ی آب-خاک مصالح خاک مورد مطالعه در بازه‌ی ترشدگی اندازه‌گیری و صحت مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌های خاک با منحنی‌های مشخصه مقایسه شده است.

## ۲. مصالح خاک و تجهیزات آزمایشگاهی

در این تحقیق از سه نوع خاک مختلف استفاده شده است که عبارت‌اند از: خاک ماسه‌ی رس‌دار با نشانه‌ی خمیری کم شامل ترکیبی از: ۴۰٪ ماسه و ۶۰٪ کائولینیت، خاک لای فاقد چسبندگی تهیه‌شده از منطقه‌ی گدوک در شمال استان تهران و خاک رس با نشانه‌ی خمیری کم تهیه‌شده از شهر فیروزکوه. در جدول ۱ مشخصات مصالح خاک مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.

اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌های خاک و منحنی‌های ترشدگی توسط دستگاه نشان داده‌شده در شکل ۱ انجام شده است. مطابق این شکل، در پایه‌های بالا و پایین سلول دستگاه سنگ‌های سرامیکی متخلخل با عدد عبوری ۵ اتسفر و سنگ‌های متخلخل واقع‌شده‌اند تا امکان اندازه‌گیری و یا کنترل مکش بافتی با استفاده از روش جابجایی محوری از دو انتهای نمونه‌ی خاک میسر باشد. زهکشی آب و هوای حفره‌ی از دو سمت نمونه می‌تواند از تغییر توزیع درصد رطوبت خاک در حین استفاده از روش جابجایی محوری جلوگیری کند.

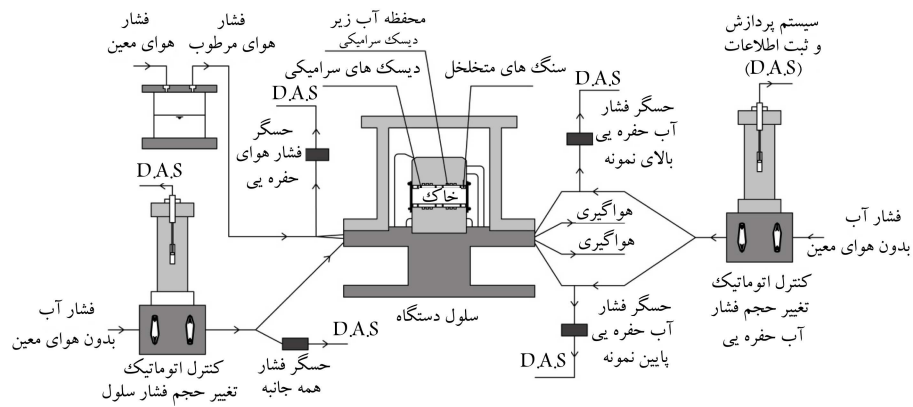
همچنین استفاده از این روش می‌تواند مدت زمان طولانی استفاده از روش جابجایی محوری را گاه‌ها تا ۴ برابر نیز کاهش دهد.<sup>[۱۴]</sup> ضخامت سنگ‌های سرامیکی مورد استفاده در تحقیق برابر ۳٫۷۵ میلی‌متر بود که این امر نیز باعث کاهش زمان لازم برای رسیدن به حالت تعادل شده است.

همچنین ضخامت ۲ سانتی‌متری سلول فلزی دستگاه، امکان اندازه‌گیری تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک را با اندازه‌گیری حجم آب ورودی و خروجی به درون سلول دستگاه میسر می‌سازد. تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک و تغییر حجم آب حفره‌ی نمونه‌ی خاک با دو دستگاه اتوماتیک اندازه‌گیری تغییر حجم انجام شده است. برای ممانعت از تبخیر رطوبت نمونه‌ی خاک و یا جذب آن توسط فشار هوای اعمال‌شده به درون حفره‌های خاک، مطابق شکل ۱ هوا با فشار تنظیم‌شده قبل از ورود به

جدول ۱. مشخصات مصالح خاک.

رس فیروزکوه	لای گدوک	مخلوط ماسه-کائولینیت	خاک
۳۰	-	۲۳٫۵	حد روانی (%)
۹	فاقد چسبندگی	۹٫۵	نشانه‌ی خمیری (%)
۲٫۷۵	۲٫۶۸	۲٫۶۶	وزن مخصوص دانه‌ها
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	دانه‌های ریزتر از ۴٫۷۵ میلی‌متر (%)
۸۸٫۷	۶۲	۴۰	دانه‌های ریزتر از ۷۵ میکرومتر (%)
۲۰	۱۵	۱۴	دانه‌های ریزتر از ۲ میکرومتر (%)
۱۴٫۱	۱۲٫۵	۹٫۶	رطوبت بهینه* (%)
۱۸٫۰۶	۱۸٫۶۵	۱۹٫۷۱	بیشترین وزن مخصوص خاک* (kN/m <sup>۳</sup> )
CL	ML	SC	نوع خاک، طبقه‌بندی متحد

\* به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد.



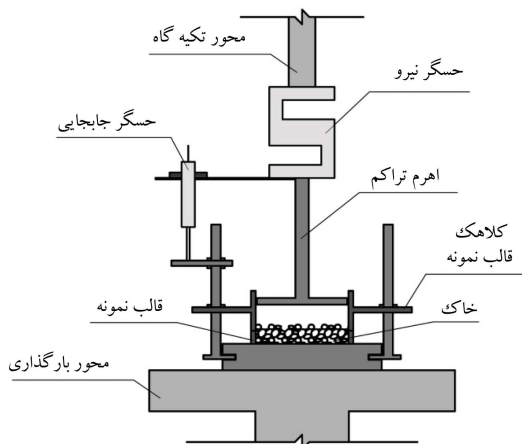
شکل ۱. اجزای مختلف دستگاه مورد استفاده در تحقیق.

تراکم شده‌اند. تراکم استاتیکی نمونه‌های خاک مطابق شکل ۲ درون یک قاب بارگذاری انجام پذیرفته است. برای این امر وزن مشخصی از خاک مرطوب درون یک قالب تراکم به قطر داخلی ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ سانتی‌متر ریخته شده است. مطابق این شکل برای جلوگیری از ریختن خاک درون قالب در حین عمل تراکم یک کلاهک قالب به ارتفاع ۳ سانتی‌متر بر روی قالب نمونه تعبیه شده است.

پژوهشگران در سال ۱۹۹۶ برای تراکم استاتیکی نمونه‌های خاک لای به ارتفاع ۷٫۶ سانتی‌متر در سه لایه یی یکسان، ابتدا لایه یی میانی نمونه یی خاک را با سرعت بارگذاری ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه تا رسیدن به ارتفاع مفروض تراکم و مقدار تنش وارد بر خاک را اندازه‌گیری، [۱۵] و سپس دو لایه یی خارجی نمونه یی خاک را با توجه به بیشینه یی تنش اندازه‌گیری شده در تراکم لایه یی میانی تراکم کرده‌اند. همچنین در سال ۲۰۰۹ نیز از سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه برای تراکم استاتیکی هر یک از لایه‌های مختلف نمونه‌های خاک لای با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. [۱۶]

در این تحقیق تراکم استاتیکی نمونه یی خاک با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا تراکم کامل نمونه و رسیدن به ارتفاع ۱ سانتی‌متر انجام شده است. مطابق شکل ۲ مقدار ارتفاع نمونه یی خاک توسط یک حسگر جابجایی در طول عمل تراکم کنترل و مقدار نیروی لازم برای تراکم هر یک از نمونه‌های خاک به وسیله یی یک حسگر نیرو اندازه‌گیری شده است.

در شکل ۳ نمودار تنش تراکمی وارد بر نمونه‌های خاک لای در مرحله یی تراکم



شکل ۲. روش تراکم استاتیکی نمونه‌های خاک.

سلول دستگاه از یک محفظه یی بسته و نیمه پر از آب عبور داده شده است تا مانع تبخیر رطوبت نمونه یی خاک در طول انجام آزمایش شود.

### ۳. برنامه یی آزمایش‌ها

در این مطالعه یی آزمایشگاهی ابتدا نمونه‌های خاک در مقادیر مفروض نسبت تخلخل و درصد رطوبت به روش استاتیکی تراکم شده‌اند. سپس مکش باقی نمونه‌های خاک تراکم شده با استفاده از روش جابجایی محوری اندازه‌گیری شده است. همچنین منحنی مشخصه یی آب-خاک نمونه‌های خاک در بازه یی ترشده یی اندازه‌گیری شده است که در ادامه، روند و جزئیات آن‌ها ذکر شده است.

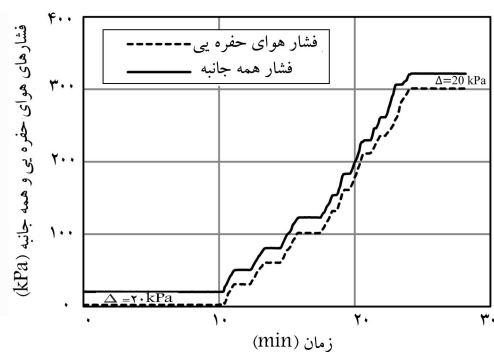
### ۳.۱. بازسازی نمونه‌های خاک

نمونه‌های خاک در مقادیر مختلف وزن مخصوص و با درصد رطوبت بهینه یی خاک به روش استاتیکی تراکم شدند. در ابتدا درصد رطوبت خاک خشک به مقدار متناظر با رطوبت بهینه یی خاک (جدول ۱) رسانده و از الک شماره یی ۱۰ عبور داده شد تا اندازه یی کلوخه‌های تشکیل شده به هنگام مرطوب کردن خاک کاهش یابد. سپس خاک مرطوب شده به میزان ۲۴ ساعت در یک کیسه یی پلاستیکی عایق نگه‌داری شد تا رطوبت خاک همگن شود.

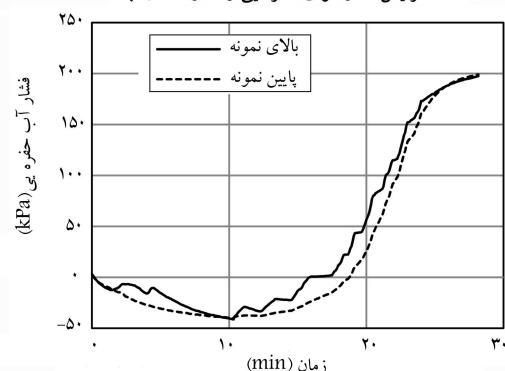
نمونه‌های خاک در مقادیر مختلف نسبت تخلخل نشان داده شده در جدول ۲

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های خاک تراکم شده به روش استاتیکی.

خاک	وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )	نسبت تخلخل	تنش تراکمی (kPa)
مخلوط ماسه و کائولینیت	۱۹٫۷۱	۰٫۳۲	۵۳۰۰
	۱۷٫۱۶	۰٫۵۲	۸۵۰
	۱۵٫۲۰	۰٫۷۲	۲۱۰
رس فیروزکوه	۱۸٫۰۶	۰٫۴۹	۴۲۰۰
	۱۵٫۷۷	۰٫۷۱	۹۹۰
	۱۴٫۱۴	۰٫۹۲	۳۴۰
لای گدوک	۱۵٫۷۷	۰٫۶۱	۷۶۰



الف) افزایش فشار هوای حفره بی و فشار همه جانبه؛



ب) جابجایی فشار آب حفره بی بالا و پایین نمونه ی خاک از مقادیر منفی به مقادیر مثبت.

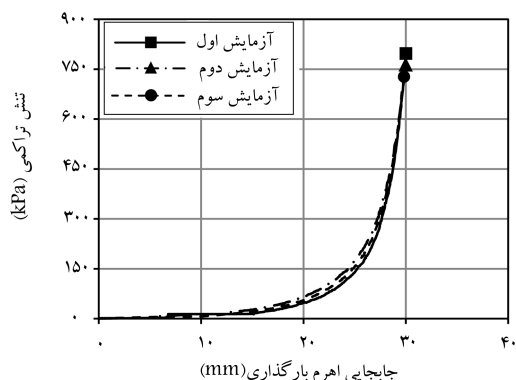
شکل ۵. افزایش فشار آب حفره بی منفی نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹ با استفاده از روش جابجایی محوری.

با گذشت زمان و ادامه‌ی روند کاهش فشار آب درون محفظه‌ی زیر سنگ‌های سرامیکی بالا و پایین برای جلوگیری از رسیدن آن‌ها به مقدار  $10^{\circ}$  کیلو پاسکال و رخداد خلاءسازی، فشار هوای حفره بی و فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه‌ی خاک به‌صورت یکسان و پیوسته از مقادیر  $0^{\circ}$  و  $20^{\circ}$  کیلو پاسکال به‌ترتیب تا مقادیر  $30^{\circ}$  و  $32^{\circ}$  کیلو پاسکال افزایش یافتند، تا فشار آب حفره بی نمونه‌ی خاک از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت و قابل اندازه‌گیری جابجا شوند. این امر در شکل ۵ برای نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹ نشان داده شده است.

مطابق شکل ۵ الف، روند افزایش فشارهای هوای حفره بی و همه‌جانبه به‌گونه‌ی بوده است که تنش تحکیمی وارد بر نمونه‌ی خاک همواره برابر  $20^{\circ}$  کیلو پاسکال باشد، تا باعث حفظ تماس مطلوب بین نمونه‌ی خاک و سطوح سنگ‌های سرامیکی شود. همچنین افزایش فشار هوای حفره بی درون خاک در مدت زمان ۱۵ دقیقه به‌صورت پیوسته با نرخ تقریبی  $20^{\circ}$  کیلو پاسکال بر دقیقه انجام شده است تا یک پارچگی ارتباط بین آب درون حفره‌های خاک و حفره‌های سنگ‌های سرامیکی، و آب زیر محفظه‌ی سنگ‌های سرامیکی کاملاً حفظ شود. مطابق شکل ۵ ب افزایش فشار هوای حفره بی باعث افزایش فشار آب حفره بی بالا و پایین نمونه‌ی خاک شده است.

به‌طور متداول و بسته به نوع خاک بعد از گذشت زمان ۲ الی ۶ ساعت فشار آب حفره بی بالا و پایین نمونه‌ها به حالت تعادل و مقادیر مساوی رسیده و مکش بافتی نمونه‌ی خاک اندازه‌گیری شده است. این امر برای نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹ در شکل ۶ نشان داده شده است.

ضخامت کم نمونه‌های خاک (۱ سانتی‌متر)، زهکشی دو طرفه‌ی نمونه‌ی خاک، و ضخامت کم (۳٫۵ میلی‌متر) سنگ‌های سرامیکی بر روی مدت زمان کم رسیدن نمونه‌های خاک به حالت تعادل این تحقیق مؤثر بوده است. همچنین در تمامی

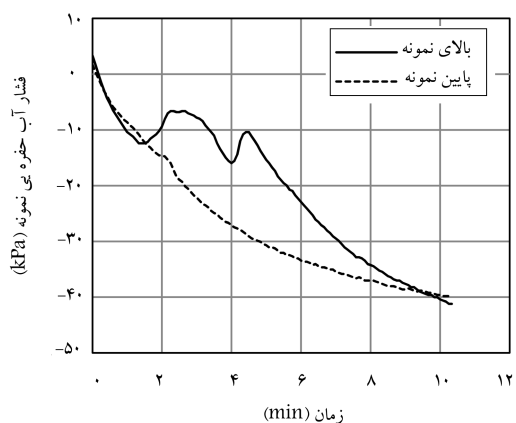


شکل ۳. تغییرات تنش تراکمی وارد بر نمونه‌های خاک لای در حین تراکم استاتیکی.

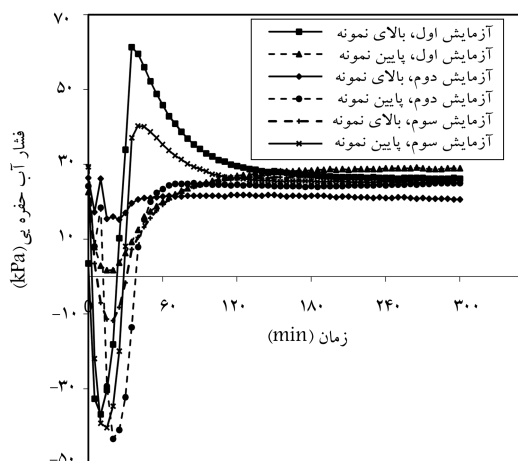
ترسیم شده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۳ و نتایج به‌دست آمده در خاک‌های دیگر حاکی از تکرار پذیری تنش‌های تراکمی اندازه‌گیری شده با خطای کمتر از  $1^{\circ}$  بوده است. در جدول ۲ مقادیر تنش تراکمی متناظر با هر یک از نمونه‌های خاک آورده شده است.

### ۲.۳. اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌های خاک

در ابتدا برای اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌های خاک، بخش‌های مختلف دستگاه آماده شدند. سنگ‌های متخلخل سرامیکی سلول دستگاه با فشار ۷ اتمسفر اشباع و تا زمان تعبیه‌ی نمونه‌های خاک بر روی آن‌ها در حالت کاملاً اشباع نگه داشته شدند. همچنین مجاری فشار هوا و سنگ‌های متخلخل نیز بعد از اشباع سنگ‌های سرامیکی کاملاً خشک و مجاری فشار آب حفره بی نمونه‌ی خاک نیز با آب بدون هوا کاملاً پر و نمونه‌های خاک متراکم شده‌ی درون سلول دستگاه تعبیه و سلول دستگاه نیز از آب بدون هوا پر شد. سپس فشار همه‌جانبه‌ی  $20^{\circ}$  کیلو پاسکال در داخل سلول اعمال شد تا تماس مطلوبی بین سطوح نمونه‌ی خاک و سطوح سنگ‌های سرامیکی و سنگ‌های متخلخل برقرار شود. بعد از گذشت چند دقیقه مشاهده شد که به واسطه‌ی فشار منفی آب حفره بی نمونه‌های خاک، فشار آب محفظه‌ی زیر سنگ‌های سرامیکی بالا و پایین تا مقادیر کمتر از  $40^{\circ}$  کیلو پاسکال کاهش یافته است. این امر در شکل ۴ برای یک نمونه‌ی خاک رس متراکم شده در نسبت تخلخل ۰٫۴۹ نشان داده شده است.



شکل ۴. تغییرات فشار آب حفره بی بالا و پایین نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹ بعد از تعبیه‌ی درون سلول دستگاه.



شکل ۸. حالت تعادل فشار آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه‌ی خاک مخلوط ماسه -کائولینیت با نسبت تخلخل ۰٫۵۲.

جدول ۳. مکش بافتی متوسط اندازه‌گیری‌شده‌ی نمونه‌های خاک.

خاک	نسبت تخلخل	مکش بافتی اولیه (kPa)
مخلوط ماسه و کائولینیت	۰٫۳۲	۲۵۲
	۰٫۵۲	۲۷۴
رس فیروزکوه	۰٫۷۲	۲۶۲
	۰٫۴۹	۷۷
لای گدوک	۰٫۷۱	۱۰۴
	۰٫۹۲	۱۰۱
	۰٫۶۱	۴۵

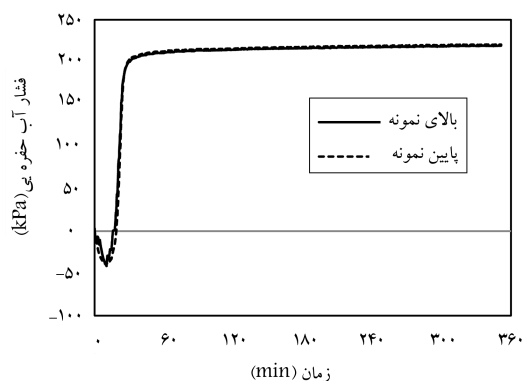
جدول ۳ متوسط مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده از دو انتهای نمونه‌ها با توجه به تکرار آزمایش بر روی نمونه‌ها آورده شده است.

### ۳.۳. اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌ی آب - خاک

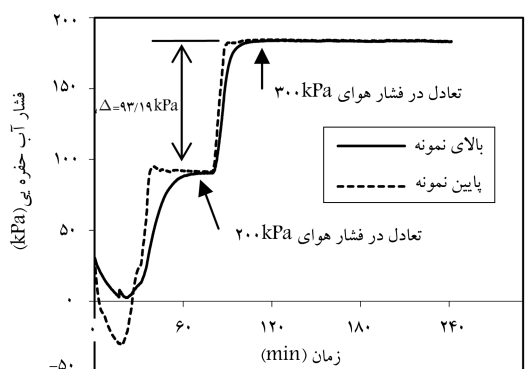
برای بررسی صحت مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی اندازه‌گیری‌شده، بازه‌ی ترشدگی منحنی مشخصه‌ی آب - خاک تمامی نمونه‌های خاک مورد استفاده در بخش ۲.۳. این تحقیق اندازه‌گیری شد.

برای این امر، نمونه‌های خاک با توجه به روند اشاره‌شده در بخش ۱.۳. مطابق با مشخصات مندرج در جدول ۲ بازسازی شده‌اند. در ادامه، منحنی مشخصه‌ی ترشدگی آب - خاک نمونه‌های خاک رس و مخلوط ماسه - کائولینیت در بازه‌ی مکش بافتی ۰ الی ۴۰۰ کیلوپاسکال و منحنی مشخصه‌ی آب - خاک لای گدوک در بازه‌ی مکش بافتی ۰ الی ۱۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد.

مطابق نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در جدول ۳، مقدار مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده‌ی تمامی نمونه‌های خاک رس و مخلوط ماسه - کائولینیت کمتر از ۴۰۰ کیلوپاسکال و مکش بافتی اولیه‌ی نمونه‌های خاک لای نیز کمتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال بوده است. در نتیجه برای اندازه‌گیری منحنی ترشدگی در بازه‌ی مفروض، مکش بافتی نمونه‌های خاک رس و مخلوط ماسه - کائولینیت و نمونه‌های خاک



شکل ۶. حالت تعادل فشار آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹.

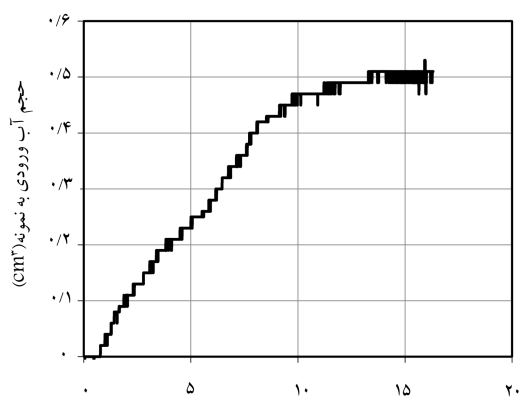


شکل ۷. حالت تعادل فشار آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰٫۴۹.

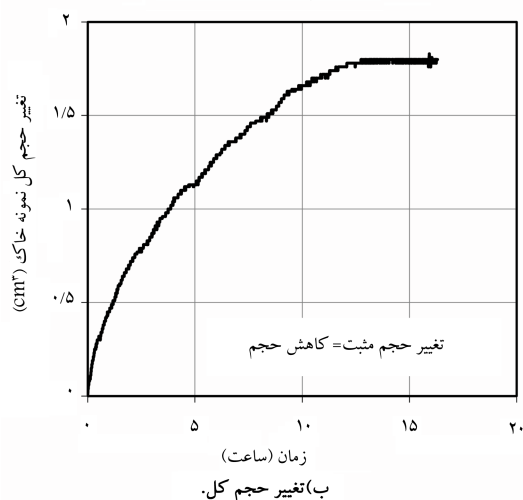
آزمایش‌ها مقدار ۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش فشار هوای حفره‌ی نمونه‌های خاک باعث انتقال فشار آب حفره‌ی نمونه‌ها به مقادیر مثبت بین ۳۰ الی ۲۱۰ کیلوپاسکال شده و از جمع و یا آزاد شدن حباب‌های هوا در زیر سنگ‌های سرامیکی و مجاری اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی جلوگیری کرده است.

برای بررسی تأثیر مقدار افزایش فشار هوای حفره‌ی بر روی مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده در یکی از آزمایش‌ها، ابتدا فشار هوای حفره‌ی به مقدار ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش یافت. سپس با رسیدن فشارهای آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه‌ی خاک به حالت تعادل، فشار هوای حفره‌ی خاک به مقدار ۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش یافت و تغییرات فشار آب حفره‌ی خاک تا رسیدن به حالت تعادل اندازه‌گیری شد (شکل ۷). مطابق این شکل به واسطه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال افزایش فشار هوای حفره‌ی مقدار فشار آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه نیز به مقدار تقریباً مساوی ۹۳/۱۹ کیلوپاسکال افزایش یافته است. اختلاف جزئی مشاهده‌شده بین مقدار افزایش فشار هوای حفره‌ی و مقدار افزایش یافته‌ی فشار آب حفره‌ی (برابر ۷/۸۱ کیلوپاسکال) به واسطه‌ی عدم تراکم ناپذیری کامل فاز آب حفره‌ی درون خاک است.

تکرارپذیری و دقت مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی مکش بافتی نیز با اجرای مکرر روند فوق برای هر یک از نمونه‌های خاک مترآم‌شده بررسی شد. برای مثال، در شکل ۸ تغییرات فشار آب حفره‌ی بالا و پایین یک نمونه‌ی خاک مخلوط ماسه - کائولینیت مترآم‌شده در نسبت تخلخل ۰٫۵۲ نشان داده شده است که بیان‌گر تشابه تغییرات فشار آب حفره‌ی بالا و پایین نمونه‌ی خاک در هر سه آزمایش انجام شده است. در



الف) حجم آب ورودی به نمونه؛  
زمان (ساعت)



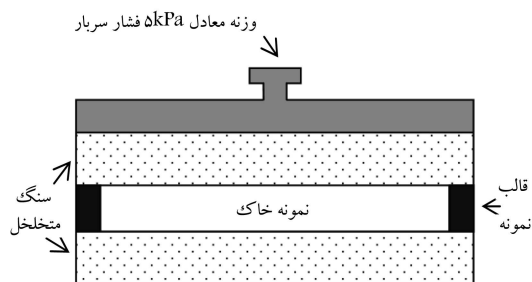
ب) تغییر حجم کل.  
زمان (ساعت)

شکل ۱۰. کاهش مکش بافتی نمونه‌ی هواده‌ی شده‌ی خاک رس با نسبت تخلخل ۰/۴۹ به مکش بافتی ۴۰۰ کیلوپاسکال.

#### ۴. تفسیر نتایج

مکش بافتی گونه‌های مختلف خاک ماسه، لای و رس با انجام مجموعه‌ی آزمایش‌های مختلف با استفاده از روش جابجایی محوری اندازه‌گیری شد. در ادامه، صحت مقادیر مکش بافتی به دست آمده با اندازه‌گیری بازه‌های ترشدگی منحنی مشخصه و مقایسه با آن‌ها بررسی شد.

تجهیزات و روند آزمایش‌ها به گونه‌ی انجام پذیرفت تا از رخداد عوامل خطای متداول و مرتبط با استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌ها جلوگیری شود. برای کاهش مدت طولانی آزمایش و امکان جابجایی آب درون حفره‌های خاک، اندازه‌گیری و یا کنترل فشارهای آب و هوای حفره‌ی به‌طور مستقل از هر دو انتهای نمونه‌ها انجام پذیرفت. همچنین ضخامت کم سنگ‌های سرامیکی مورد استفاده در تحقیق (برابر ۳/۵ میلی‌متر) باعث کاهش مدت زمان انجام آزمایش‌ها شده است. برای کاهش میزان تبخیر رطوبت نمونه‌های خاک، افزایش فشار هوای حفره‌ی با استفاده از هوای مرطوب‌شده انجام شده است. همچنین تنش‌های تحکیمی وارد بر نمونه‌های خاک در حین افزایش فشار هوای حفره‌ی همواره ثابت (برابر ۲۰ کیلوپاسکال) نگه داشته شد تا از رخداد هرگونه تغییر حجم در نمونه‌ها جلوگیری شود. این امر با افزایش هم‌زمان و پیوسته‌ی فشار همه‌جانبه‌ی وارد بر نمونه‌ی خاک میسر شده است. اعمال تنش‌های همه‌جانبه‌ی تحکیمی



شکل ۹. هواده‌ی نمونه‌های خاک.

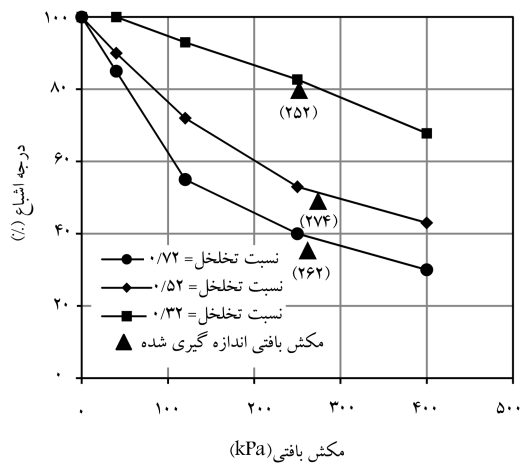
لای با هواده‌ی به ترتیب به مقادیر بیشتر از ۴۰۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است. برای این امر بعد از تراکم استاتیکی نمونه‌های خاک، دو سنگ متخلخل در دو انتهای نمونه برای تبخیر یکنواخت رطوبت خاک تعبیه شد (مطابق شکل ۹). تماس مطلوب بین قالب نمونه‌ی خاک و سنگ‌های متخلخل نیز با قراردادن یک وزنه معادل با فشار ۵ کیلوپاسکال بر روی سنگ متخلخل بالا برقرار شده است.

قطر سنگ‌های متخلخل با قطر خارجی قالب نمونه برابر بوده است تا از انتقال فشار سربار به سطوح صاف نمونه‌های خاک جلوگیری شود. هواده‌ی نمونه‌های خاک مخلوط ماسه-کائولینیت و لای و نمونه‌های رس به ترتیب به میزان ۲۴ و ۱۲ ساعت باعث افزایش مکش بافتی آن‌ها به مقادیری بیشتر از مقادیر مفروض شد. صحت این امر با تعبیه‌ی نمونه‌های خاک درون دستگاه و ترکردن آن‌ها به مقادیر مکش بافتی مفروض بررسی شده است.

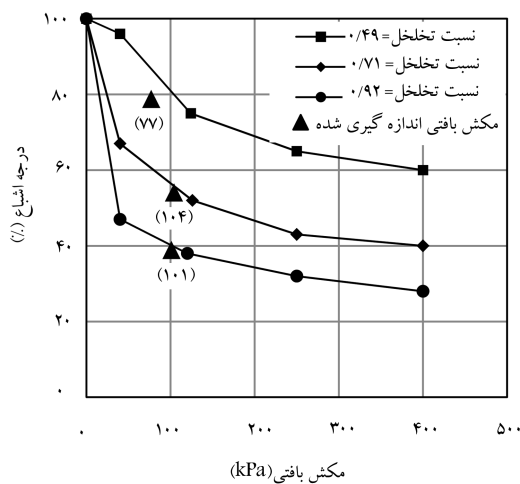
بعد از خارج کردن نمونه‌های خاک هواده‌ی شده از درون قالب خاک، قطر و ارتفاع نمونه‌ها به دقت اندازه‌گیری شده است تا میزان کاهش حجم جزئی آن‌ها به واسطه‌ی هواده‌ی (در حدود ۰/۲ الی ۰/۵ سانتی‌متر مکعب) اندازه‌گیری و در محاسبات مرتبط در نظر گرفته شود. سپس نمونه‌های خاک هواده‌ی شده درون سلول دستگاه تعبیه و محفظه‌ی سلول دستگاه نیز با آب بدون هوا پر شده است.

منحنی ترشدگی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌های خاک مخلوط ماسه-کائولینیت و رس با کاهش مکش بافتی نمونه‌های هواده‌ی شده به مقادیر ۴۰۰، ۲۵۰، ۱۲۰، ۴۰ و صفر کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. این امر برای نمونه‌های خاک لای نیز با کاهش مکش بافتی نمونه‌های هواده‌ی شده به مقادیر ۱۰۰، ۵۰، ۲۵ و صفر کیلوپاسکال انجام شد. در نمونه‌های خاک رس و مخلوط ماسه-کائولینیت فشارهای هوای حفره‌ی و همه‌جانبه‌ی به صورت پیوسته و مساوی به ترتیب به مقادیر ۴۵۰ و ۴۷۰ کیلوپاسکال افزایش یافتند. سپس تغییر مکش بافتی نمونه‌ها فقط با تغییر فشار آب حفره‌ی نمونه‌ی خاک انجام شد و مقدار فشارهای هوای حفره‌ی و همه‌جانبه‌ی همواره ثابت بود، تا از بروز خطا در اندازه‌گیری تغییر حجم کل نمونه‌ی خاک به واسطه‌ی تغییر فشارهای همه‌جانبه و یا هوای حفره‌ی جلوگیری شود. روند مشابهی نیز برای نمونه‌های خاک لای به ترتیب با اعمال فشارهای هوای حفره‌ی و همه‌جانبه‌ی ۳۰۰ و ۳۲۰ کیلوپاسکال انجام پذیرفت. بسته به نوع خاک، میزان تراکم و مکش بافتی نمونه، زمان رسیدن به حالت تعادل در هر مرحله‌ی کاهش مکش بافتی نمونه‌ها بین ۱۲ تا ۲۴ ساعت به طول انجامیده است.

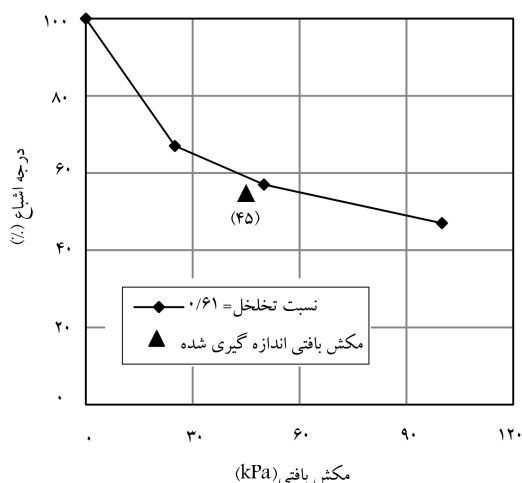
در شکل ۱۰ نمودار حجم آب ورودی و تغییر حجم کل یک نمونه‌ی رس با نسبت تخلخل اولیه‌ی ۰/۴۹ به واسطه‌ی کاهش مکش بافتی از وضعیت هواده‌ی شده به مقدار ۴۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ به واسطه‌ی کاهش مکش بافتی و ترشدن، حجم نمونه‌ی خاک کاهش یافته است. روند مشابهی نیز در تمامی نمونه‌های خاک مورد مطالعه در این تحقیق مشاهده شد.



شکل ۱۱. مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده و منحنی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌های خاک مخلوط ماسه-کائولینیت.



شکل ۱۲. مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده و منحنی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌های خاک رس.



شکل ۱۳. مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده و منحنی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه‌های خاک لای.

۲۰ کیلوپاسکال در طول اندازه‌گیری مکش بافتی باعث ایجاد تماس مطلوب بین سطوح نمونه‌های خاک و سطوح پایه‌های بالا و پایین دستگاه و مشاهده‌ی مقادیر یکسان مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده از دو انتهای نمونه‌ها در طول آزمایش شده است.

در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ منحنی‌های ترشدگی مشخصه‌ی آب-خاک به ترتیب برای نمونه‌های مخلوط ماسه-کائولینیت، رس فیروزکوه و لای گدوک آورده شده است. همچنین مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی اندازه‌گیری‌شده‌ی نمونه‌های خاک نیز مشخص شده‌اند.

مطابق نتایج آزمایشگاهی مندرج در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ مشاهده شده است که با وجود درصد رطوبت تراکم یکسان نمونه‌ها، منحنی‌های مشخصه‌ی اندازه‌گیری‌شده در مقادیر مختلف نسبت تخلخل متفاوت بوده و با افزایش تراکم و کاهش نسبت تخلخل نمونه‌ها، منحنی‌های مشخصه‌ی ترشدگی آب-خاک به سمت بالا جابجا شده است.

در واقع در یک مقدار درصد رطوبت اولیه‌ی مفروض، کاهش نسبت تخلخل نمونه‌ها باعث کاهش حجم حفره‌های پر از هوای درون خاک و مجاری اتصال آن‌ها به یکدیگر شده و در یک مکش بافتی مفروض مطابق شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ باعث افزایش درجه‌ی اشباع خاک و جابجایی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک به سمت بالا شده است. پژوهشگران در سال ۱۹۹۹ نیز روند مشابهی برای جابجایی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک به واسطه‌ی کاهش نسبت تخلخل خاک مشاهده کرده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی اندازه‌گیری‌شده‌ی نمونه‌های خاک مندرج در جدول ۳ در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ برای حالات مختلف نسبت تخلخل اولیه‌ی خاک مشخص و مقادیر آن‌ها نیز در داخل پراکنش بر حسب کیلوپاسکال درج شده است.

با وجود درصد رطوبت تراکم یکسان نمونه‌های خاک، مکش بافتی نمونه‌ها متفاوت و تابعی از میزان تراکم و نسبت تخلخل خاک است. همچنین بررسی شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ بیان‌گر این مطلب است که مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی اندازه‌گیری‌شده‌ی نمونه‌های خاک در یک نسبت تخلخل مفروض تقریباً بر روی منحنی ترشدگی مشخصه‌ی آب-خاک نمونه در همان نسبت تخلخل واقع شده‌اند. این روند برای تمامی نمونه‌های خاک مشاهده شده و حاکی از صحت مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده با استفاده از روش جابجایی محوری در هر سه نوع خاک مخلوط ماسه-کائولینیت، لای گدوک و رس فیروزکوه بوده است.

رفتار تغییر حجمی فرو ریزشی نمونه‌های خاک در حین اندازه‌گیری منحنی مشخصه‌ی ترشدگی آب-خاک باعث شده است تا نسبت تخلخل نمونه‌های خاک به میزان اندکی نسبت به مقدار اولیه‌ی آن‌ها کاهش یابد. این امر باعث شده است تا مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری‌شده کاملاً بر روی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک واقع نشود و به میزان اندکی در پایین منحنی واقع شوند. این مسئله در نمونه‌ی خاک رس فیروزکوه با نسبت تخلخل ۰/۴۹ در شکل ۱۲ نسبت به سایر نمونه‌های خاک مشهودتر است.

در طول تراکم استاتیکی نمونه‌های خاک، درجه‌ی اشباع آن‌ها تا رسیدن به نسبت تخلخل مفروض همواره افزایش یافته است. در نتیجه وضعیت نمونه‌های خاک متراکم‌شده بعد از مرحله‌ی تراکم باید بر روی بازه‌ی ترشدگی منحنی مشخصه‌ی آب-خاک واقع شود. نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ نیز حاکی از واقع شدن وضعیت نمونه‌های خاک متراکم‌شده بر روی منحنی ترشدگی

مشخصه‌ی آب-خاک و کارایی استفاده از روش جابجایی محوری در اندازه‌گیری مکش بافتی نمونه‌های خاک بوده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی کارایی استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی گونه‌های مختلف خاک‌ها پرداخته شد. همچنین منحنی مشخصه‌ی ترشدگی خاک‌های مورد استفاده در تحقیق اندازه‌گیری و صحت مقادیر مکش بافتی اندازه‌گیری شده با توجه به آن‌ها بررسی شده است.

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده به گونه‌ی بوده است تا از بروز بسیاری از مشکلات متداول در استفاده از روش جابجایی محوری برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک‌ها همچون مدت زمان آزمایش، تغییرشکل نمونه‌ی خاک به واسطه‌ی اعمال فشار هوا، تغییر در توزیع آب درون حفره‌های خاک و تبخیر رطوبت نمونه‌ی خاک جلوگیری کند.

نتایج به دست آمده بیان‌گر این امر است که نمونه‌های خاک متراکم‌شده در یک مقدار درصد رطوبت یکسان و نسبت تخلخل‌های مختلف دارای مقادیر مکش بافتی متفاوتی بوده‌اند. همچنین مقادیر مکش بافتی اولیه‌ی نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش جابجایی محوری با رفتار منحنی مشخصه‌ی آب-خاک سازگار بوده و بر روی بازه‌ی ترشدگی منحنی‌های مشخصه‌ی آب-خاک واقع شده‌اند.

## منابع (References)

- Ridley, A.M. and Wray, W.K. "Suction measurement: A review of current theory and practices", *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, Unsaturated Soils, E.E. Alonso and P. Delage (eds.), A.A. Balkema/Presses des Ponts et Chaussées, Paris, **3**, pp. 1293-1322 (1996).
- Agus, S.S. and Schanz, T. "Comparison of four methods for measuring total suction", *Vadose Zone J.*, **4**(4), pp. 1087-1095 (2005).
- Delage, P., Romero, E.E. and Tarantino, A. "Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils", *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering – Toll et al. (eds)© 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47692-8*, pp. 33-52 (2008).
- Richards, L.A. "A pressure membrane extraction apparatus for soil suction", *Soil Science*, **51**(5), pp. 377-386 (1941).
- Gardner, W.R. "Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **20**(3), pp. 317-320 (1956).
- Hilf, J.W. "An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils", Ph.D. Thesis. Technical Memo No.654, United States Bureau of Reclamation, Denver (1956).
- Widger, R.A. "Slope stability in unsaturated soils", M.Sc. Thesis, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada, 71 p. (1976).
- Filson, H.L. "A study of heave analysis using the oedometer test", M.Sc. thesis, Univ. of Saskatchewan, Saskatoon, Sask., Canada (1980).
- Olson, R.E. and Langfelder, L.J. "Pore-water pressures in unsaturated soils", *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, **91**, SM4, pp. 127-160 (1965).
- Fredlund, D.G., *Soil Suction Monitoring for Roads and Airfields*, Symposium on the State-of-the-Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields, Sponsored by the U.S. Army Corps of Engineers (Hanover, NH) (6-9 March 1989).
- Oliveira, O.M. and Marinho, F.A.M. "Study of equilibration time in the pressure plate", *Proc. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Unsaturated Soils*, Geotechnical Special Publication 147. G.A. Miller, C.E. Zapata, S.L. Houston and D.G. Fredlund (eds). ASCE, **2**, pp. 1864-1874 (2006).
- Romero, E. "Characterisation and thermo-hydromechanical behaviour of unsaturated boom clay: An experimental study", Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain (1999).
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., *Soil mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc. New York (1993).
- Rojas, J.C., Mancuso, C. and Vinale, F. "A modified triaxial apparatus to reduce testing time: Equipment and preliminary results", *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering – Toll et al. (eds)© 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47692-8*, pp. 103-109 (2008).
- Cui, Y.J. and Delage, P. "Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt", *Géotechnique*, **46**(2), pp. 291-311 (1996).
- Uchaipichat, A. and Khalili, N. "Experimental investigation of thermo-hydro-mechanical behaviour of an unsaturated silt", *Geotechnique*, **59**(4), pp. 339-353 (2009).



# APPLICATION OF AXIS TRANSLATION TECHNIQUE FOR MEASURING INITIAL MATRIX SUCTION OF COMPACTED SOIL ON WETTING PORTION OF SWCC

**A. Mirzaii**

ali.mirzaii@kashanu.ac.ir

**Faculty of Engineering  
University of Kashan**

**S.S. Yasrobi**(corresponding author)

yasrobis@modares.ac.ir

**Dept. of Civil and Environmental Engineering  
Tarbiat Modares University**

**N. Khalili**

n.khalili@unsw.edu.au

**Dept. of Civil and Environmental Engineering  
University of New South Wales Australia**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 127-136, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 12 September 2011; received in revised form 1 May 2012; accepted 15 October 2012.

## Abstract

The axis translation technique is the most commonly used technique of controlling suction. Nevertheless, the axis translation is not diversely utilized for measuring soil suction, due to many difficulties concerning the application of this technique, such as lengthy test procedure, evaporation and condensation, air diffusion, soil volume changes, change of soil pore water distributions, and the interface of soil and measuring equipment. In this paper, the applicability of the axis translation technique is determined in measuring the initial matrix suction of a variety of compacted soils, including sand, silt, and clay. Elaborate experimental laboratory equipment is set up to minimize the occurrence of common errors associated with the application of axis translation techniques for suction measurement. The cell of the apparatus was equipped with porous stones and five bar ceramic disks in its bottom pedestal and top cap to minimize the lengthy procedure time and possible change in soil pore water distribution associated with controlling and measuring soil matrix suction using the axis translation technique. Additionally, the pressurized air entering the cell was passed through a closed container, half filled with water, before going to the cell, to minimize the loss of soil water content during the test. Soil samples were statically compressed inside a load frame in different compaction states with standard proctor optimum

water content. The degree of saturation of samples was increased during the compression stage. Therefore, the compacted soil samples would be expected to locate on the wetting portion of the soil-water characteristic curve. After the compaction stage, soil samples were installed inside the apparatus and confined with a lateral pressure of 20 kPa to provide good contact between the end sides of specimens and the surfaces of the matrix suction measuring devices. Consequently, pore air and net confining pressure were identically and gradually increased to 300 and 320 kPa to shift the sample negative pore water pressure to a positive measurable value. Analogous positive pressures were stabilized in both ends of the samples within four to eight hours. Additionally, the wetting portion of the soil-water characteristic curve of the soil under study was measured with the testing equipment to validate the values of initial matrix suction measurements. The comparison of results shows that the sample soil suction measurements are located on their wetting soil-water characteristic curve.

**Key Words:** unsaturated soils, compressibility, matrix suction measurement, axis translation technique, soil-water characteristic curve.