

رفتار تحکیمی خاک‌های رسی رمبنده در شرایط غیراشباع و اشباع

علیرضا باقریه* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر

علی فارسی جانی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات همدان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵ (ص. ۵۴-۳۳)
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۱/۱، ص. ۵۴-۳۳

تأثیر مکش در رفتار تحکیمی خاک از آن جهت که نقشی تعیین‌کننده در مدل‌های رفتاری دارد، همواره مورد توجه پژوهشگران این زمینه بوده است. در این پژوهش به بررسی تأثیر ساختار اولیه‌ی نمونه‌های خاک رسی رمبنده در رفتار تحکیمی آنها در شرایط غیراشباع و اشباع پرداخته شده است. نمونه‌های خاک با توجه به منحنی تراکم با شرایط اولیه‌ی متفاوت (مکش، تخلخل، وزن مخصوص خشک و رطوبت) ساخته شده‌اند. برای بررسی رفتار تغییر حجم خاک رمبنده، نمونه‌ها در شرایط ادهومتريک تا میزان تنش مشخصی بارگذاری شده‌اند. با حفظ مقدار تنش، تغییرات حجم در اثر اشباع اندازه‌گیری شده است. با افزایش درجه‌ی اشباع و پس از فروپاشی نمونه، بارگذاری و افزایش مرحله به مرحله ادامه یافته است. براساس نتایج، تفاوت رفتار نمونه‌های مختلف خاک غیراشباع به علت تغییرات شرایط اولیه، بعد از فروپاشی حجمی نسبت به خاک اشباع در منحنی تحکیم نرمال بررسی شده است. نتایج نشان داده است که شرایط اولیه‌ی نمونه‌های خاک، تأثیر قابل توجهی در رفتار تحکیمی آنها در حالت اشباع ندارد و نمونه‌های خاک با شرایط اولیه‌ی متفاوت بعد از فروپاشی، رفتار تحکیمی مشابه از خود نشان می‌دهند. خط تحکیم نرمال اشباع نمونه‌ها با شرایط اولیه‌ی متفاوت، خطی واحد به دست آمده است. این نتیجه موجب تسهیل در پیش‌بینی تغییر شکل خاک‌های رمبنده در اثر اشباع شدن خواهد شد.

واژگان کلیدی: رفتار تحکیمی، خاک غیراشباع، فروپاشی حجمی، پتانسیل رمبندگی، فیلتر کاغذی.

bagheri@malayeru.ac.ir
afarsijani@gmail.com

۱. مقدمه

خاک اشباع، بر پایه‌ی این فرض استوار است که خاک از دو فاز آب و دانه‌های جامد خاک تشکیل شده است. در حالی که در مکانیک خاک غیراشباع، خاک شامل ۳ فاز آب، هوا و دانه‌های جامد خاک است. در بسیاری از موارد، روابطی که در مکانیک خاک اشباع ارائه شده است، جهت بیان رفتار خاک در حالت غیراشباع فاقد اعتبار است. تعمیم اصول مکانیک خاک اشباع به مکانیک خاک غیراشباع مستلزم بیان رفتار تغییر حجمی، مقاومت برشی و هیدرولیکی خاک با تغییرات در میزان اشباع‌شدگی آن است.^[۷] فروپاشی حجمی یکی از رفتارهای تغییر حجمی در خاک‌های نیمه‌اشباع یا غیراشباع است. در واقع خاک‌های رمبنده یا فروریزشی، خاک‌های غیراشباع با ساختمانی باز، تقریباً مستحکم و نسبتاً مرطوب هستند، که تحت تنش کافی قرار دارند. در این‌گونه خاک‌ها شرایط خاص قرارگیری ذرات کنار هم سبب شکل‌گیری نیروهای موقتی می‌شود که به علت نیروهای موقتی در بین ذرات خود، در شرایط غیراشباع به صورت پایدار باقی می‌مانند.^[۸-۱۰] در بیشتر موارد، نیروهای موقتی ایجادشده در بین ذرات خاک‌های رمبنده به علت حضور نیروی مکش موئینگی در بین ذرات آن خاک است. در این شرایط با توجه به

طراحان باید نسبت به تغییرات رفتار خاک در حالت‌های مختلف آگاهی کافی داشته باشند. در مکانیک خاک کلاسیک، که توسط کارل ترزاقی پی‌ریزی شده است، رفتار خاک در حالت کاملاً اشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالی که در بسیاری از مناطق جهان، سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سطح لایه‌های خاکی باربر است. حتی در برخی نواحی، که میزان بارندگی سالیانه زیاد است، با وجود بالا آمدن سطح آب زیرزمینی، بسیاری از اعماق سطحی خاک، که سهم اصلی در تحمل بارهای وارده را دارند و در محدوده‌ی تنش‌های روسازه هستند، از خاک‌های نیمه‌اشباع تشکیل شده‌اند. اما با وجود این، در مکانیک خاک کلاسیک، رفتار خاک در حالت کاملاً اشباع یا کاملاً خشک در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی که نتایج حاصل از آزمایش‌های پژوهشگران مختلف در این زمینه، اختلاف رفتاری زیادی را بین نمونه‌های خاک غیراشباع و نمونه‌ها در شرایط اشباع نشان داده است.^[۶-۱] روابط حاکم در مکانیک

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۲/۷، پذیرش ۱۳۹۳/۴/۲۲

منفی بودن فشار آب حفره‌یی موجود در بین ذرات خاک، مقدار تنش مؤثر از مقدار تنش کلی اعمال شده بر روی خاک بیشتر است، که باعث ایجاد یک مقاومت ظاهری بزرگ‌تر و نهایتاً پایداری موقت ساختار خاک می‌شود. هم‌زمان با افزایش رطوبت و اشباع شدن خاک، نیروهای موقتی از بین می‌رود و ذرات خاک دچار لغزش روی یکدیگر می‌شوند و با حرکت به فضای خالی موجود در خاک، سبب ایجاد یک نشست ناگهانی می‌شوند. [۱۳-۱۱]

در طی ۳۰ سال گذشته، به‌کارگیری دو متغیر حالت تنش به شکل‌های متفاوت، جهت بیان رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع رواج یافته است. [۱۵، ۱۴] از این آنها می‌توان به تنش خالص و مکش اشاره کرد. [۱۶]

تلاش بسیاری از پژوهشگران بر این بوده است که ارتباطی بین رفتار مکانیکی خاک در حالت اشباع و غیراشباع برقرار کنند؛ از این رو رفتار تحکیمی نمونه‌های یک خاک رس خمیری در قبل و بعد از اشباع‌شدگی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از نقاط تمرکز پژوهش، بررسی موقعیت خط پایان تحکیم اولیه برای نمونه‌هایی است که در شرایط مختلف تهیه، بارگذاری و اشباع شده‌اند.

۲. تعریف مفاهیم اساسی

۱.۲. مکش خاک

استفاده از مفهوم پتانسیل در مسائل مربوط به الکتروسیسته و مغناطیس‌م کاربرد زیادی دارد و همچنین در تعریف مسائل مربوط به فشارهای حفره‌یی بین دانه‌های خاک کاربرد دارد. این در حالی است که مفاهیمی مشابه، نظیر انرژی آزاد و پتانسیل ترمودینامیکی کاربرد جامع‌تری نسبت به مفهوم پتانسیل دارند. این مفاهیم علاوه بر اینکه در مسائل شیمی فیزیک و ترمودینامیک کاربرد دارند، می‌توانند در مسائل مربوط به فازهای جامد، مایع و گاز موجود در بین حفره‌های خاک در حالت تعادل مورد استفاده قرار گیرند. [۱۷] از این رو در مکانیک خاک‌های غیراشباع، به حالت انرژی آزاد آب درون خاک، مکش گفته می‌شود. [۱۸، ۱۷] تعریف رایج مکش کل بیان می‌دارد که مکش کل حاصل جمع مکش بافتی و مکش اسمزی است. اگر مکش اسمزی وجود نداشته باشد؛ صرف‌نظر از وسیله یا روش اندازه‌گیری، مکش کل برابر با مکش بافتی است. به‌طور کلی سهم مکش اسمزی اغلب در مقایسه با مکش بافتی قابل چشم‌پوشی است. [۱۹] مکش بافتی خاک به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$S = u_a - u_w \quad (1)$$

که در آن، S مکش بافتی خاک، u_a فشار هوای حفره‌یی و u_w فشار آب حفره‌یی است.

۲.۲. سخت‌شوندگی مکشی و فروپاشی حجمی

فشار آب و هوای حفره‌یی (u_w, u_a) از دو طریق در رفتار مکانیکی خاک‌های غیراشباع تأثیر می‌گذارند و سبب ایجاد سخت‌شوندگی مکشی در این‌گونه خاک‌ها می‌شوند. اول اینکه با توجه به مکش بافتی حاصل از فشارهای آب و هوای حفره‌یی موجود در بین ذرات خاک غیراشباع، مقدار تنش مؤثر در اسکلت خاک افزایش یافته است، که باعث ایجاد یک مقاومت ظاهری بزرگ‌تر و در نتیجه پایداری موقت ساختار خاک می‌شود. دوم اینکه به‌علت شکل‌گیری سطحی هلالی‌گونه‌ی ناشی از نیروی مکش مؤینگی (مکش بافتی) در نقاط تماس ذرات، نیروهای قائم بین ذره‌یی در بین دانه‌های خاک ایجاد شده است، که سطح تماس ذرات خاک را ثابت و از

لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر جلوگیری می‌کند. [۲۰، ۱۱] این تأثیر ثانویه که به‌عنوان سخت‌شوندگی مکشی شناخته می‌شود، همانند پیوند شیمیایی در مواد سیمانته شده است. [۱۱] یکی از نتایج سخت‌شوندگی مکشی، پدیده‌ی فروپاشی حجمی در خاک‌های غیراشباع به محض افزایش رطوبت در خاک است. [۲۳، ۲۲] در صورتی که این ۳ شرط مهیا باشد، پدیده‌ی فروپاشی قابل ملاحظه‌یی در خاک‌های غیراشباع رخ خواهد داد: [۲۴]

۱. خاک موردنظر در ازاء افزایش درجه‌ی اشباع، پتانسیل ریمبده‌ی (فروپاشی حجمی) داشته باشد.

۲. افزایش رطوبت و درجه‌ی اشباع در خاک موردنظر تا حد بحرانی ادامه پیدا کند. منظور از حد بحرانی درجه‌ی اشباعی است که نیروهای موقتی و سخت‌شوندگی ایجاد شده در اثر مکش به قدری کاهش یابد که در اثر اعمال نیروهای خارجی، ساختار نیمه پایدار خاک فرو ریزد.

۳. مقدار تنش اعمالی بر توده‌ی خاک غیراشباع به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، که در ازاء آن و هم‌زمان با اشباع‌شدن خاک، پدیده‌ی فروپاشی حجمی رخ دهد.

هم‌زمان با افزایش درجه‌ی اشباع در نمونه‌های خاک ریمبده، نیروهای موقتی بین دانه‌های خاک که سبب پایداری موقت خاک شده‌اند از بین می‌رود و دانه‌های خاک روی هم سُر می‌خورند و در فضای خالی موجود در خاک قرار می‌گیرند، که به این پدیده فروپاشی حجمی گفته می‌شود. [۲۳، ۲۲]

۳.۲. تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع

اصل تنش مؤثر، یکی از اصول اولیه و مهم در مکانیک خاک است. تنش مؤثر تابع تنش‌های خارجی اعمال شده بر روی توده‌ی خاک و فشارهای سیال داخل خاک است. تنش مؤثر، محیط چندفازی با شرایط نفوذپذیری چندگانه‌ی خاک را به محیطی تک‌فازی و تک‌تنشی با شرایط مکانیکی واحد تبدیل می‌کند. [۲۶، ۲۵، ۱۱] رابطه‌ی تنش مؤثر در خاک‌های اشباع‌شده توسط کارل ترزاقی به‌صورت رابطه‌ی ۲ بیان شده است: [۲۷]

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

که در آن، σ' تنش مؤثر، σ تنش کل و u_w فشار آب حفره‌یی است.

بعد از آن تاکنون پژوهش‌های زیادی بر روی رفتار مکانیکی خاک اشباع انجام شده است، که منجر به ارائه‌ی مفاهیمی مانند حالت بحرانی و مدل‌های رفتاری مختلف شده است. [۲۸-۳۰]

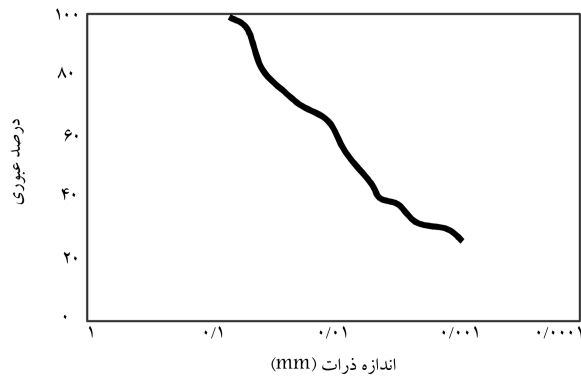
تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع توسط بیشاپ به این صورت بیان شده است: [۱۶]

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (3)$$

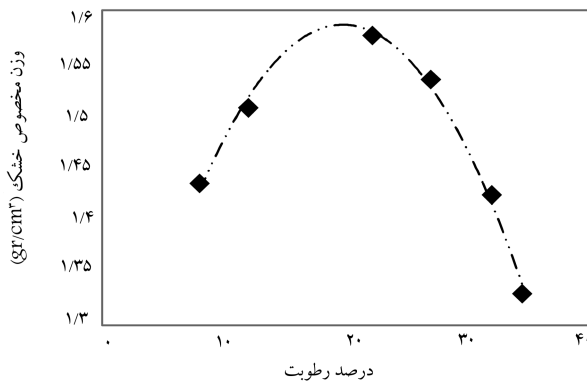
که در آن، σ' تنش مؤثر، σ تنش کل، u_a فشار هوای حفره‌یی، u_w فشار آب حفره‌یی و χ ضریب تنش مؤثر است. ضریب تنش مؤثر توسط خلیلی و خباز با استفاده از رابطه‌ی ۴ پیشنهاد شده است: [۳۱]

$$\chi = \begin{cases} \left(\frac{u_a - u_w}{u_e} \right)^{-0.55} & (u_a - u_w) > u_e \\ 1 & (u_a - u_w) \leq u_e \end{cases} \quad (4)$$

که در آن، u_e مکش ورودی هوا و متناظر با حالتی است که خاک از حالت اشباع کامل خارج می‌شود.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه.



شکل ۲. منحنی تراکم خاک مورد مطالعه.

جدول ۲. مدت زمان رسیدن به تعادل رطوبتی.^[۱۹]

مکش کل (kPa)	مدت زمان لازم
۰-۱۰۰	مدت خاصی مشخص نشده، اما قطعاً بیش از ۳۰ روز است.
۱۰۰-۲۵۰	۳ روز
۲۵۰-۱۰۰۰	۱۵ روز
۱۰۰۰-۳۰۰۰۰	۷ روز

ساتی‌گراد نیاز است. اساس کار به این صورت است که فیلترهای کاغذی در نمونه‌ی خاک مورد آزمایش طبق روشی که قبلاً ذکر شده است، به مدت لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی با خاک، در محیطی با دمای ثابت قرار داده می‌شوند. در این حالت مکش ماتریک (بافتی) نمونه‌ی خاک مرطوب معادل مکش ماتریک (بافتی) کاغذ صافی است. در این برنامه‌ی آزمایشگاهی، مکش ماتریک (بافتی) کاغذ صافی با استفاده از کالیبراسیون هابلین و همچنین رابطه‌ی ۶، که توسط هابلین ارائه شده است، به دست می‌آید.^[۲۶]

$$\ln(10^{\psi_m}) = -2,397 - 3,683 \ln\left(\frac{f}{100}\right) \quad (6)$$

که در آن، ψ_m مکش بافتی کاغذ صافی بر حسب مگاپاسکال و f درصد رطوبت وزنی فیلتر کاغذی است.

بهترین بازه‌ی زمانی لازم جهت رسیدن به تعادل رطوبتی در روش فیلتر کاغذی در جدول ۲ ارائه شده است.^[۱۹]

۴.۲. پتانسیل رهمبندگی

در طول سال‌های مختلف، معیارهای گوناگونی برای بیان پتانسیل رهمبندگی خاک‌های فرورزشی ارائه شده است. در این پژوهش، پتانسیل رهمبندگی خاک با رابطه‌ی ۵ بیان شده است:^[۳۲]

$$cp = \frac{\Delta e}{1 + e_1} \quad (5)$$

که در آن، cp پتانسیل رهمبندگی، Δe کاهش نسبت تخلخل بعد از اشباع شدن خاک و e_1 نسبت تخلخل خاک قبل از مرطوب شدن (اشباع‌شدگی) است.

۳. برنامه و روند آزمایشگاهی

۱.۳. خصوصیات نمونه‌ی خاک مورد آزمایش

خاک مورد آزمایش از الک ۲۰۰ عبور داده شده است. آزمایش‌های شناسایی بر روی خاک مورد مطالعه انجام شده است. همچنین براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در رده‌ی CH (خاک عمدتاً رسی با حالت خمیری بالا) طبقه‌بندی شده است. جدول ۱، مشخصات حدود اتربرگ، مشخصات تراکمی و وزن مخصوص جامد خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی دانه‌بندی و تراکم منحنی خاک را نشان می‌دهند.

۲.۳. روش فیلتر کاغذی برای تعیین مکش خاک

روش فیلتر کاغذی، که اولین بار در امور مربوط به کشاورزی و پژوهش‌های کاربردی در مورد شناخت خاک توسعه داده شده است، روشی ساده، کم هزینه و با پاسخ‌های منطقی و دقیق است، که برای تعیین مکش خاک نسبت به بسیاری از روش‌های آزمایشگاهی جایگزین مناسبی است.^[۳۳]

روش فیلتر کاغذی یکی از روش‌های غیرمستقیم جهت تعیین مکش خاک است.^[۱۸] روش فیلتر کاغذی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، از یک سه‌پایه پلاستیکی برای جدا کردن فیلتر کاغذی از نمونه‌ی خاک استفاده می‌شود. در این حالت از سمت نمونه‌ی خاک، جریان ذرات بخار آب به سمت فیلتر کاغذی تا زمان رسیدن به تعادل رطوبتی برقرار است. این روش برای تعیین مکش کلی خاک کاربرد دارد. در روش تماس مستقیم از ۳ فیلتر کاغذی استفاده می‌شود. با استفاده از فیلتر میانی میزان مکش اندازه‌گیری می‌شود و ۲ فیلتر دیگر از فیلتر میانی در برابر ذرات ریز و چسبیده‌ی خاک محافظت می‌کنند تا ذرات خاک به فیلتر میانی چسبیده نشوند. این روش برای تعیین مکش بافتی خاک کاربرد دارد.^[۳۵-۳۳،۱۸]

در تعیین مکش خاک با روش فیلتر کاغذی، به یک ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم، کاغذ صافی واتمن شماره‌ی ۴۲ و آون با دمای ۱۰۵ درجه‌ی

جدول ۱. مشخصات حدود اتربرگ و تراکمی خاک مورد مطالعه.

۲۰	درصد رطوبت بهینه
۱,۵۸	وزن مخصوص خشک بیشینه (gr/cm ^۳)
۵۲,۵	حد روانی (%)
۲۵	حد خمیری (%)
۲۷,۵	نشانه‌ی خمیری (%)
۲,۶۷	چگالی دانه‌های خاک

۴.۳. جزئیات آزمایش تحکیم تک‌محوری

در این کار آزمایشگاهی، دو گروه آزمایش تحکیم تک‌محوری در شرایط اشباع و غیراشباع برای شناسایی تأثیر ساختار اولیه‌ی نمونه‌ی خاک ریبند در میزان تغییر حجم و رفتار تحکیمی آن پس از اشباع انجام شده است. نمونه‌های گروه اول (نمونه‌های اشباع)، قبل از اعمال تنش کاملاً اشباع شده‌اند. سپس تحت تنش‌های اعمالی مختلفی قرار گرفته‌اند. هر بار که تنش بر نمونه‌ها اعمال شده است، نمونه‌ها به مدت زمان لازم (گاهی ۳ روز) تحت تنش مورد نظر قرار گرفته‌اند تا نشست حاصل از تنش اعمالی در نمونه‌ها انجام شود و تحکیم اولیه تکمیل شود. در مورد اطمینان از کافی بودن زمان برای تحکیم اولیه به ازا هر بار وارده، روش کار بدین صورت بوده است که با ترسیم منحنی نشست در برابر لگاریتم زمان و مجانب شدن نمودار با محور افقی از کافی بودن زمان داده شده در هر مرحله‌ی تحکیم اطمینان حاصل شده است. سپس تنش اعمالی بر روی نمونه‌ها با افزایش وزنه بر روی اهرم دستگاه تحکیم تک‌محوری افزایش یافته است. این روند افزایش تنش، مرحله به مرحله ادامه پیدا کرده و با ثبت تغییرات ارتفاع نمونه‌ها، میزان نشست و تغییر حجم‌شان در هر تنش اعمالی ثبت شده است. نمونه‌های گروه دوم (نمونه‌های غیراشباع)، با درصد رطوبت اولیه، مکش بافتی متفاوت و چگالی مختلف تا میزان مشخصی بارگذاری و سپس تحت تنش ثابت با افزایش آب اشباع شده‌اند. بعد از اشباع‌شدگی، نمونه‌ها تحت همان تنش ثابت، به مدت زمان لازم (گاهی ۷ روز) جهت تکمیل نشست حاصل از اشباع‌شدگی (فروپاشی حجمی) قرار گرفته‌اند. بعد از کامل شدن نشست حاصل از اشباع‌شدگی، روند افزایش تنش بر روی نمونه‌های اشباع شده، مرحله به مرحله ادامه پیدا کرده است. تغییرات حجم نمونه‌ها در شرایط مختلف توسط کنترل تغییرات ارتفاع آنها ثبت شده است.

لازم به توضیح است که دو گروه نمونه با وزن مخصوص خشک ۱٫۰۷ و ۱٫۲۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب ساخته شده است تا تأثیر تغییرات وزن مخصوص خشک اولیه در رفتار تحکیمی نمونه‌ها بعد از اشباع شدن مورد بررسی قرار گیرد. در نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک اولیه ۱٫۰۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۴ گروه نمونه با رطوبت‌های اولیه ۶٪، ۹٪، ۱۵٪ و ۲۸٪ و همچنین در نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک ۱٫۲۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب نیز ۴ گروه با درصد رطوبت‌های اولیه ۶٪، ۹٪، ۱۵٪ و ۲۳٪ بازسازی شده است تا تأثیر تغییرات میزان رطوبت اولیه و مکش در رفتار تحکیمی نمونه‌های خاک بعد از اشباع‌شدگی مورد بررسی قرار گیرد؛ همچنین در هر گروه رطوبتی، ۳ نمونه در ۳ تنش قائم اعمالی متفاوت اشباع شده‌اند تا تأثیر تغییرات تنش اشباع‌شدگی نیز در رفتار تحکیمی نمونه‌ها بعد از اشباع‌شدگی مورد بررسی قرار گیرد.

۴. نتایج آزمایش‌ها

۱.۴. نتایج آزمایش تعیین مکش

برای تعیین منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، نمونه‌های خاک در تراکم‌های مختلف بازسازی و فیلترهای کاغذی همانند روشی که در بند ۲.۳. شرح داده شده است، در نمونه‌ها قرار داده شده‌اند. برای کاهش خطا در هر تراکم مشخص، ۳ گروه مشابه از نمونه‌ها و در هر گروه، ۷ نمونه با وزن مخصوص یکسان و رطوبت متفاوت بازسازی شده است. در شکل ۵ منحنی مشخصه آب - خاک در تراکم‌های مختلف با استفاده از نتایج آزمایش ترسیم شده است.

مکش ماتریک برای نمونه‌های خاک در هر وزن مخصوص معینی با استفاده از روابط تقریبی که در جدول ۳ مشخص شده، به دست آمده است. در جدول ۳، S مکش خاک بر حسب کیلوپاسکال و w درصد رطوبت خاک است؛ همچنین



شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش مستقیم.

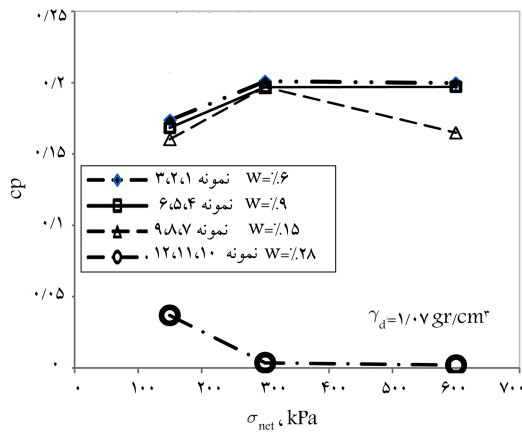


شکل ۴. نحوه‌ی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش غیرمستقیم.

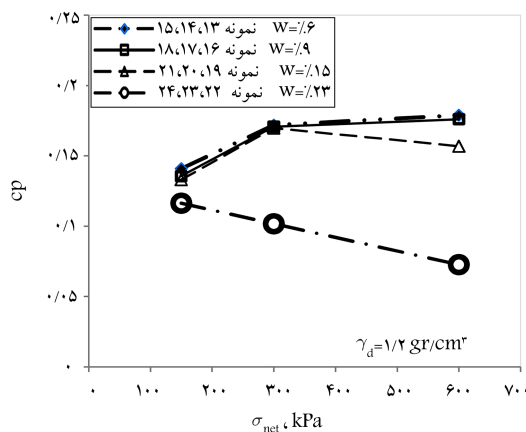
نحوه‌ی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

۳.۳. روش آماده‌سازی نمونه‌ی تحکیمی

ابتدا به خاک مورد مطالعه به اندازه‌ی موردنظر با اسپری رطوبت داده شده است. سپس جهت یکنواخت شدن رطوبت در آن، نمونه‌ی خاک در ۶ لایه از جنس پلاستیکی مقاوم در برابر نفوذ رطوبت، بسته‌بندی شده و در ظرفی سر بسته به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته است. بعد از طی این مدت، خاک مرطوب از بسته‌بندی خارج و مقداری از خاک جهت تعیین رطوبت در ظرفی ریخته شده و بلافاصله توزین شده است. مقداری دیگر جهت ساخت نمونه‌ی تحکیمی با توجه به مشخص بودن حجم قالب آزمایش ادنومتر و با در نظر گرفتن وزن مخصوص خشک مشخص، در دو مرحله درون قالب فلزی تحکیم با ارتفاع ۲ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر ریخته و به صورت استاتیکی با استفاده از جک هیدرولیکی متراکم شده است. بلافاصله نمونه‌ی تحکیمی تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته است. نمونه‌ی رطوبتی نیز در آون با دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و میزان رطوبت آن مشخص شده است تا اطمینان حاصل شود که رطوبت حین ساخت به اندازه‌ی رطوبت موردنظر است. در صورتی که میزان رطوبت تعیین شده برابر مقدار موردنظر بوده است، آزمایش تحکیم با توجه به روند خود ادامه پیدا کرده است. در غیر این صورت آزمایش تحکیم متوقف و روند آماده‌سازی نمونه از سر گرفته شده است تا شرایط اولیه‌ی موردنظر مهیا شود.



شکل ۶. پتانسیل ریبندگی نمونه‌ها در تنش اشباع‌شدگی متفاوت و در وزن مخصوص خشک ۱٫۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب.



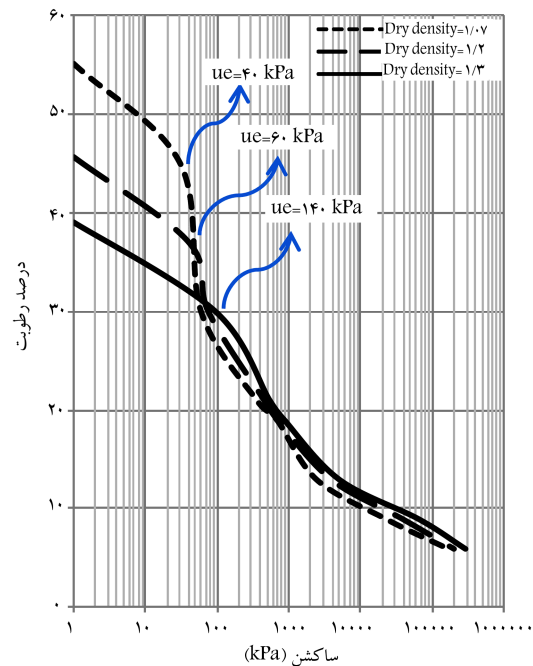
شکل ۷. پتانسیل ریبندگی نمونه‌ها در تنش‌های اشباع‌شدگی متفاوت و در وزن مخصوص خشک ۱٫۲ گرم بر سانتی متر مکعب.

کم می‌باشد، با توجه به مشخص بودن وزن مخصوص ثانویه، رطوبت نمونه خاک و منحنی مشخصه آب خاک، میزان مکش نمونه در هر تنش وارده محاسبه شد. اما در رطوبت‌های بالا که میزان آب حفره‌ی درون نمونه‌ها بیشتر است، مشخص نمی‌شود که درجه اشباع و مکش در اثر بارگذاری تا چه میزان تغییر کرده است. اما با توجه به مقادیر وزن مخصوص خشک ثانویه، منحنی‌های ریبندگی (شکل ۶ و ۷) و این قانون که در خاک اشباع پدیده ریبندگی رخ نمی‌دهد، درجه اشباع نمونه‌هایی که در تنش وارده رفتاری مشابه با نمونه‌های خاک اشباع داشتند، برابر با یک فرض شد و مکش آنها صفر تعیین شد.

با مشخص بودن مقادیر مکش برای نمونه‌های خاک در هر تنش وارده، تنش قائم اعمالی و همچنین مشخص بودن مقادیر u_e (مکش متناظر با ورود اولین حباب‌های هوا در خاک)، مقادیر مختلف تنش مؤثر با استفاده از روابط ۳ و ۴ به دست آمد و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شد. با استفاده از جدول ۵، منحنی NCL نمونه‌ها در شرایط مختلف رسم شد.

شکل‌های ۶ و ۷، میزان پتانسیل ریبندگی نمونه‌ها را با شرایط اولیه‌ی متفاوت در تنش‌های اشباع‌شدگی متفاوت نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که اثر بار در پتانسیل ریبندگی، یک اثر دو طرفه است. با افزایش تنش اعمالی تا مقدار مشخصی، پتانسیل ریبندگی افزایش می‌یابد. یعنی افزایش بار در فروریزی ساختار نیمه پایدار خاک و رسیدن



شکل ۵. منحنی مشخصه‌ی آب - خاک.

جدول ۳. جزئیات منحنی مشخصه‌ی آب - خاک.

وزن مخصوص خشک خاک (gr/cm^3)	رابطه‌ی تقریبی برای تعیین مکش خاک	u_e (kPa)
۱٫۰۷	$S = 10^9 \times w^{-4/893}$	۴۰
۱٫۲	$S = 6 \times 10^9 \times w^{-5/266}$	۶۰
۱٫۳	$S = 4 \times 10^{10} \times w^{-6/2}$	۱۴۰

مقادیر u_e بیان‌کننده‌ی مکش متناظر با حالتی است که خاک از اشباع کامل خارج می‌شود و اولین حباب‌های هوا وارد خاک می‌شوند.

۲.۴. نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

شرایط اولیه‌ی نمونه‌های تحکیمی در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به مقادیر u_e که از منحنی‌های مشخصه‌ی آب - خاک به دست آمده و روابط ۳ و ۴، تنش مؤثر در هر شرایط متفاوتی (میزان رطوبت، مکش، وزن مخصوص خشک، تراکم و تنش اعمالی) قابل محاسبه است. محاسبات مربوط به تنش مؤثر در جدول ۵ ارائه شده است.

در جدول ۵، γ_{d_t} بیان‌کننده‌ی وزن مخصوص خشک خاک در هر تنش وارده و بیش از اشباع شدن می‌باشد که در این نوشتار وزن مخصوص خشک ثانویه نام‌گذاری می‌شود؛ همچنین مقادیر σ ، σ' و S به ترتیب نشان‌دهنده تنش خالص قائم، تنش مؤثر قائم و مقدار مکش خاک می‌باشند. همچنین e_0 نشان‌دهنده تخلخل اولیه نمونه‌ها قبل از بارگذاری می‌باشد که با توجه به معین بودن حجم قالب آزمایش و مقدار وزن خاک خشک، مقدار آن برای هر نمونه مشخص شده است. به ازای هر تنش وارده بر نمونه خاک غیراشباع در آن نشست رخ می‌دهد. با گذشت زمان کافی، نشست در ازای تنش وارده بر نمونه خاک کامل شده و اضافه فشار آب حفره‌ی از بین می‌رود. سپری کردن این مراحل سبب تغییر در میزان درجه اشباع و مکش خاک می‌شود. در میزان رطوبت‌های پایین که تأثیر اضافه فشار آب حفره‌ی

به شرایط پایدار نقش کمک‌کننده دارد. ولی اگر تنش اعمالی از این مقدار معین بیشتر باشد، پتانسیل ریمبندگی کاهش می‌یابد؛ علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تنش‌های زیاد سهم قابل توجهی از تغییر شکل‌ها در بارگذاری نمونه تحت شرایط غیراشباع انجام می‌پذیرد و بدین ترتیب سهم فروپاشی حجمی ناشی از اشباع (آب‌اندازی) کاهش می‌یابد. شکل‌های ۸ الی ۱۰، نشان‌دهنده تأثیر تغییرات وزن مخصوص خشک اولیه نمونه‌های خاک در میزان پتانسیل ریمبندگی آنها در رطوبت‌های اولیه متفاوت است. با توجه به شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش وزن مخصوص خشک اولیه نمونه‌ها در شرایط یکسان (رطوبت اولیه و تنش اعمالی) حجم فروپاشی کاهش می‌یابد؛ علت این پدیده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که به علت افزایش وزن مخصوص خشک اولیه نمونه‌ها، فضای خالی بین دانه‌های خاک کمتر شده و از این رو حجم فروپاشی نمونه‌ها کاهش یافته است؛ همچنین با توجه به شکل‌های ۱۱ الی ۱۳، که نشان‌دهنده تأثیر تغییرات رطوبت اولیه در میزان پتانسیل فروپاشی حجمی نمونه‌های خاک در وزن مخصوص خشک اولیه متفاوت هستند، مشاهده می‌شود که افزایش رطوبت اولیه نمونه‌ها در شرایط

جدول ۴. مشخصات اولیه‌ی نمونه‌ها.

شماره‌ی نمونه (Sample)	وزن مخصوص خشک اولیه γ_d (gr/cm ³)	رطوبت اولیه W (%)	ارتفاع اولیه h_0 (cm)	تنش اشباع‌شدگی σ (kPa)	تخلخل اولیه e_0
۱	۱٫۰۷	۶	۲	۱۵۰	۱٫۴۹
۲	۱٫۰۷	۶	۲	۳۰۰	۱٫۴۹
۳	۱٫۰۷	۶	۲	۶۰۰	۱٫۴۹
۴	۱٫۰۷	۹	۲	۱۵۰	۱٫۴۹
۵	۱٫۰۷	۹	۲	۳۰۰	۱٫۴۹
۶	۱٫۰۷	۹	۲	۶۰۰	۱٫۴۹
۷	۱٫۰۷	۱۵	۲	۱۵۰	۱٫۴۹
۸	۱٫۰۷	۱۵	۲	۳۰۰	۱٫۴۹
۹	۱٫۰۷	۱۵	۲	۶۰۰	۱٫۴۹
۱۰	۱٫۰۷	۲۸	۲	۱۵۰	۱٫۴۹
۱۱	۱٫۰۷	۲۸	۲	۳۰۰	۱٫۴۹
۱۲	۱٫۰۷	۲۸	۲	۶۰۰	۱٫۴۹
۱۳	۱٫۲	۶	۲	۱۵۰	۱٫۲۲
۱۴	۱٫۲	۶	۲	۳۰۰	۱٫۲۲
۱۵	۱٫۲	۶	۲	۶۰۰	۱٫۲۲
۱۶	۱٫۲	۹	۲	۱۵۰	۱٫۲۲
۱۷	۱٫۲	۹	۲	۳۰۰	۱٫۲۲
۱۸	۱٫۲	۹	۲	۶۰۰	۱٫۲۲
۱۹	۱٫۲	۱۵	۲	۱۵۰	۱٫۲۲
۲۰	۱٫۲	۱۵	۲	۳۰۰	۱٫۲۲
۲۱	۱٫۲	۱۵	۲	۶۰۰	۱٫۲۲
۲۲	۱٫۲	۲۳	۲	۱۵۰	۱٫۲۲
۲۳	۱٫۲	۲۳	۲	۳۰۰	۱٫۲۲
۲۴	۱٫۲	۲۳	۲	۶۰۰	۱٫۲۲
۲۵	۱٫۱۲	۹	۹	۳۰۰	۱٫۳۸
۲۶	۱٫۰۷	۹	۲	۰	۱٫۴۹
۲۷	۱٫۰۷	۹	۲	۰	۱٫۴۹
۲۸	۱٫۰۷	۱۵	۲	۰	۱٫۴۹
۲۹	۱٫۲	۶	۲	۰	۱٫۲۲
۳۰	۱٫۲	۲۳	۲	۰	۱٫۲۲

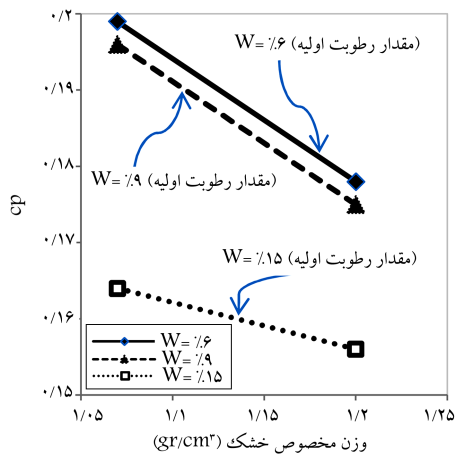
جدول ۵. محاسبات تنش مؤثر برای نمونه‌ها در هر تنش اعمالی قبل از اشباع‌شدگی.

شماره‌ی نمونه	σ (kPa)	γ_{d_r} (gr/cm ^۳)	S_r (%)	S (kPa)	χ	σ' (kPa)	شماره‌ی نمونه	σ (kPa)	γ_{d_r} (gr/cm ^۳)	S_r (%)	S (kPa)	χ	σ' (kPa)	شماره‌ی نمونه
۱	۵۰	۱٫۱۱	۱۱	۱۵۵۸۰۰	۰٫۰۱	۱۶۰۸	۱۳	۱۵۰	۱٫۲۱	۱۳	۱۹۹۷۱۰	۰٫۰۱	۲۱۴۷	۱
۱	۱۵۰	۱٫۱۴	۱۱	۱۶۳۰۰۰	۰٫۰۱	۱۷۸۰	۱۴	۱۵۰	۱٫۲۱	۱۴	۱۹۹۷۱۰	۰٫۰۱	۲۱۴۷	۱
۲	۱۵۰	۱٫۱۷	۱۲	۱۸۲۰۰۰	۰٫۰۱	۱۹۷۰	۱۴	۳۰۰	۱٫۲۲	۱۳	۲۰۰۰۰۹	۰٫۰۱	۲۳۰۰	۲
۲	۳۰۰	۱٫۲۲	۱۳	۲۰۰۰۰۹	۰٫۰۱	۲۳۰۰	۱۵	۱۵۰	۱٫۲۱	۱۳	۱۹۹۷۱۰	۰٫۰۱	۲۱۴۷	۲
۳	۱۵۰	۱٫۱۴	۱۱	۱۵۸۷۰۰	۰٫۰۱	۱۷۳۷	۱۵	۳۰۰	۱٫۲۴	۱۳	۲۴۰۵۹۶	۰٫۰۱	۲۷۰۵	۳
۳	۳۰۰	۱٫۱۹	۱۲	۱۶۳۰۰۰	۰٫۰۱	۱۹۳۰	۱۵	۶۰۰	۱٫۲۸	۱۴	۲۷۵۱۴۳	۰٫۰۱	۳۳۵۱	۳
۳	۶۰۰	۱٫۲۵	۱۴	۲۴۳۸۹۶	۰٫۰۱	۳۰۳۸	۱۶	۵۰	۱٫۲۰	۱۹	۳۶۴۹۷	۰٫۲۹	۱۱۰۸	۳
۴	۵۰	۱٫۱۱	۱۷	۲۱۹۰۰	۰٫۰۳	۷۰۷	۱۶	۱۵۰	۱٫۲۲	۲۰	۳۷۰۰۰	۰٫۲۹	۱۲۲۳	۴
۴	۱۵۰	۱٫۱۸	۱۹	۳۶۰۰۰	۰٫۰۳	۱۲۳۰	۱۷	۱۵۰	۱٫۲۲	۲۰	۳۷۰۰۰	۰٫۲۹	۱۲۲۳	۴
۵	۱۰۰	۱٫۱۳	۱۷	۲۸۳۰۰	۰٫۰۲۷	۸۶۴	۱۷	۳۰۰	۱٫۲۳	۲۰	۳۷۵۴۰	۰٫۲۹	۱۳۸۸	۵
۵	۲۰۰	۱٫۱۵	۱۸	۳۲۰۰۰	۰٫۰۲۵	۱۰۰۰	۱۸	۱۵۰	۱٫۲۲	۲۰	۳۷۰۰۰	۰٫۲۹	۱۲۲۳	۵
۵	۳۰۰	۱٫۱۶	۱۸	۳۴۰۰۰	۰٫۰۳	۱۳۲۰	۱۸	۳۰۰	۱٫۲۴	۲۰	۳۸۱۲۵	۰٫۲۹	۱۴۰۵	۵
۶	۱۵۰	۱٫۱۴	۱۸	۲۹۲۲۰	۰٫۰۲۶	۹۰۹	۱۸	۶۰۰	۱٫۲۸	۲۲	۴۲۱۵۸	۰٫۰۴	۲۲۸۶	۶
۶	۳۰۰	۱٫۱۶	۱۸	۳۴۰۰۰	۰٫۰۳	۱۳۲۰	۱۹	۵۰	۱٫۲۱	۳۳	۲۰۹۰	۰٫۱۴	۳۴۲	۶
۶	۶۰۰	۱٫۱۸	۱۹	۳۶۰۰۰	۰٫۰۲۹	۱۶۴۴	۱۹	۱۵۰	۱٫۲۲	۳۳	۲۱۵۰	۰٫۱۴	۴۵۱	۶
۷	۵۰	۱٫۱۱	۲۸	۱۷۵۰	۰٫۱۲	۲۶۰	۲۰	۱۵۰	۱٫۲۲	۲۰	۲۱۵۰	۰٫۱۴	۴۵۱	۷
۷	۱۵۰	۱٫۲	۳۳	۲۰۴۸	۰٫۱۴	۴۳۶	۲۰	۳۰۰	۱٫۲۴	۳۵	۲۱۹۸	۰٫۱۴	۶۰۷	۷
۸	۱۵۰	۱٫۱۶	۳۰	۱۹۰۰	۰٫۱۴	۴۱۶	۲۱	۱۵۰	۱٫۲۲	۳۳	۲۱۵۰	۰٫۱۳۹	۴۴۸	۸
۸	۳۰۰	۱٫۲۵	۳۵	۲۲۰۳	۰٫۱۳	۵۸۶	۲۱	۳۰۰	۱٫۲۵	۳۵	۲۲۰۳	۰٫۱۳۷	۶۰۱	۸
۹	۱۵۰	۱٫۱۵	۳۰	۱۸۵۰	۰٫۱۲	۳۷۲	۲۱	۶۰۰	۱٫۳۳	۳۹	۲۲۵۰	۰٫۲۱	۱۰۷۲	۹
۹	۳۰۰	۱٫۲۳	۳۴	۲۱۰۸	۰٫۱۴	۵۹۵	۲۲	۵۰	۱٫۲۸	۵۷	۴۲۶	۰٫۵۴۲	۲۸۰	۹
۹	۶۰۰	۱٫۳۴	۴۰	۲۲۸۵	۰٫۲۱	۱۰۷۹	۲۲	۱۵۰	۱٫۳۲	۶۰	۴۴۶	۰٫۵۲۸	۳۸۵	۹
۱۰	۵۰	۱٫۳۴	۷۶	۴۲	۱	۹۲	۲۳	۱۵۰	۱٫۳۹	۶۴	۳۰۰	۰٫۶۵	۳۴۵	۱۰
۱۰	۱۵۰	۱٫۴	۸۳	۳۰	۱	۱۸۰	۲۳	۳۰۰	۱٫۳۹	۶۷	۲۲۰	۰٫۷۷	۴۶۹	۱۰
۱۱	۱۵۰	۱٫۴	۸۳	۳۰	۱	۱۸۰	۲۴	۱۵۰	۱٫۲۸	۵۷	۴۲۶	۰٫۵۴۲	۳۸۰	۱۱
۱۱	۳۰۰	۱٫۵۵	۱۰۰	۱	۱	۳۰۱	۲۴	۳۰۰	۱٫۳۵	۶۳	۲۸۰	۰٫۶۸	۴۹۰	۱۱
۱۲	۱۵۰	۱٫۴	۸۳	۳۰	۱	۱۸۰	۲۴	۶۰۰	۱٫۵۲	۷۸	۶۰	۱	۶۶۰	۱۲
۱۲	۳۰۰	۱٫۵۶	۱۰۰	۱	۱	۳۰۱	۲۵	۱۰۰	۱٫۱۴	۱۸	۲۹۲۲۰	۰٫۲۶	۸۵۹	۱۲
۱۲	۶۰۰	۱٫۶۹	۱۰۰	۱	۱	۶۰۱	۲۵	۲۰۰	۱٫۱۶	۱۸	۳۴۰۰۰	۰٫۰۳	۱۲۲۰	۱۲
۱۳	۵۰	۱٫۲	۱۳	۱۹۸۵۰۹	۰٫۰۱	۲۰۳۵	۲۵	۳۰۰	۱٫۱۸	۱۹	۳۶۰۰۰	۰٫۲۹	۱۳۴۱	۱۳

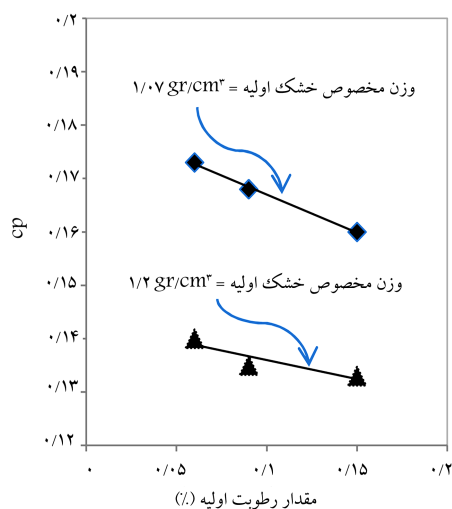
یکسان (تنش اعمالی و وزن مخصوص خشک اولیه) باعث کاهش پتانسیل ریمندگی نمونه‌ها شده است. در حالت کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که افزایش وزن مخصوص خشک اولیه و یا میزان رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ها، سبب کاهش پتانسیل ریمندگی شده است، که این نتایج مشابه با مشاهداتی برخی پژوهشگران است. [۲۴، ۱۰]

شکل‌های ۱۴ الی ۲۱، نشان‌دهنده‌ی منحنی‌های تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های مختلف است. با توجه به منحنی‌ها، رفتار نمونه‌های خاک غیراشباع بعد از فروپاشی حجمی با رفتار آنها در حالت اشباع مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر شرایط اولیه‌ی نمونه‌های خاک غیراشباع در رفتار تحکیمی آنها پس از اشباع مشخص شود.

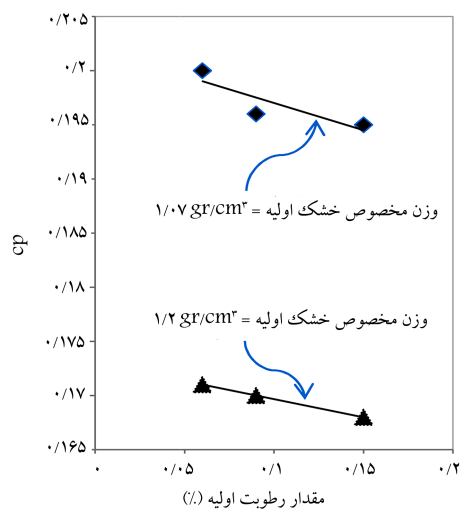
همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ الی ۲۱ مشاهده می‌شود که در مسیر فروپاشی، تنش مؤثر قائم در نمونه‌های غیراشباع بیشتر از تنش مؤثر قائم در نمونه‌های اشباع است و هر چه میزان رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و مقدار مکش آنها کمتر می‌شود، مقدار تنش قائم مؤثر در حالت غیراشباع کمتر و به مقدار تنش قائم مؤثر در حالت اشباع نزدیک‌تر می‌شود. همچنین با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که تغییرات شرایط اولیه‌ی نمونه‌ها (مقدار مکش، تخلخل، وزن مخصوص خشک، میزان رطوبت و تنش اشباع‌شدگی)، تأثیر قابل توجهی در رفتار



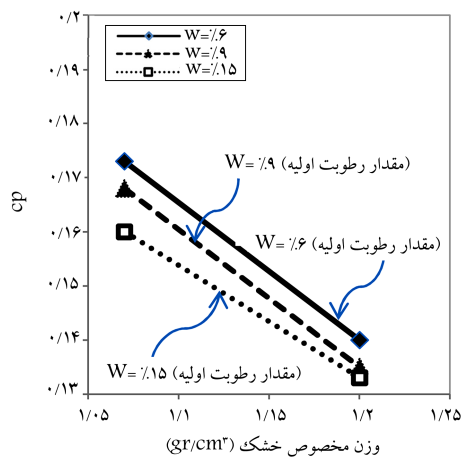
شکل ۱۰. تأثیر وزن مخصوص خشک اولیه در پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۶۰۰ کیلوپاسکال.



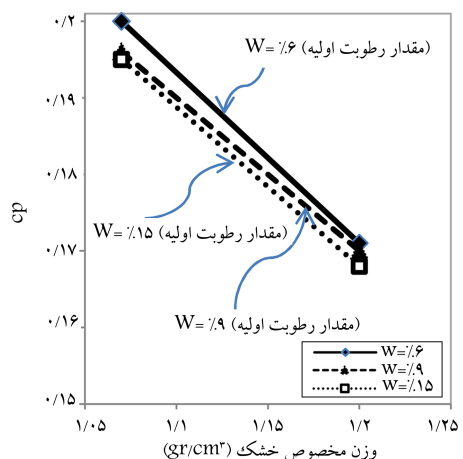
شکل ۱۱. تأثیر رطوبت اولیه در پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۱۵۰ کیلوپاسکال.



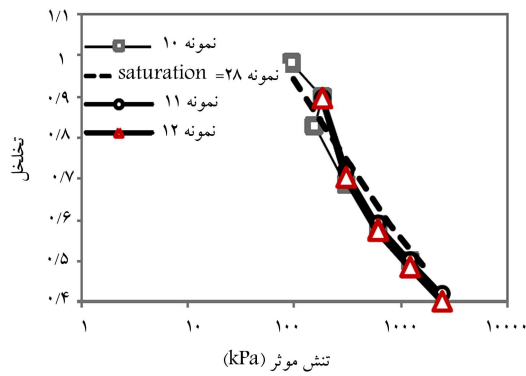
شکل ۱۲. تأثیر رطوبت اولیه بر پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۳۰۰ کیلوپاسکال.



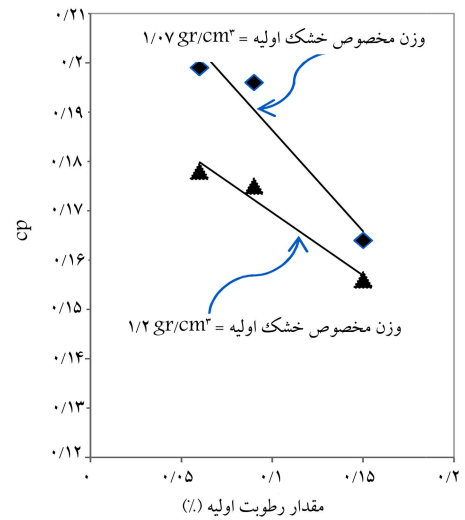
شکل ۸. تأثیر وزن مخصوص خشک اولیه در پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۱۵۰ کیلوپاسکال.



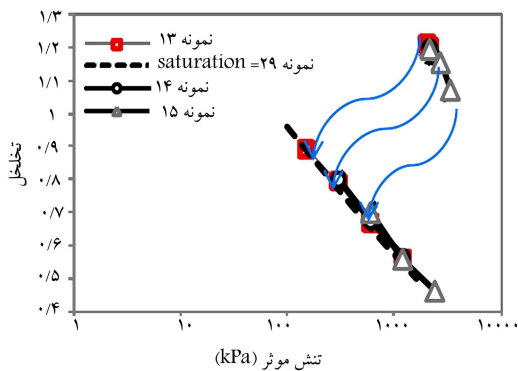
شکل ۹. تأثیر وزن مخصوص خشک اولیه در پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۳۰۰ کیلوپاسکال.



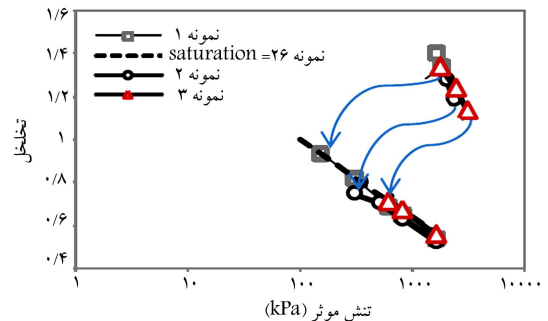
شکل ۱۷. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۱۰، ۱۱، و ۱۲.



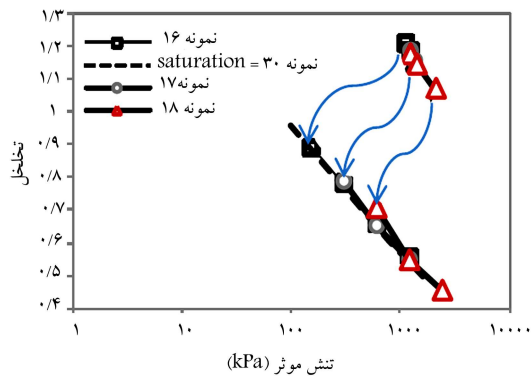
شکل ۱۳. تأثیر رطوبت اولیه در پتانسیل فروپاشی خاک مورد مطالعه در تنش اعمالی ۶۰۰ کیلوپاسکال.



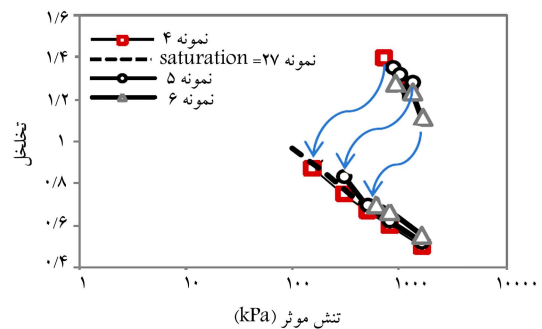
شکل ۱۸. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۱۳، ۱۴، و ۱۵.



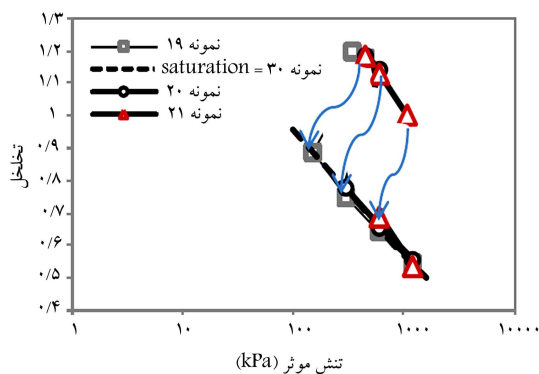
شکل ۱۴. منحنی تحکیم قبل از فروپاشی در نمونه‌های ۱، ۲، و ۳.



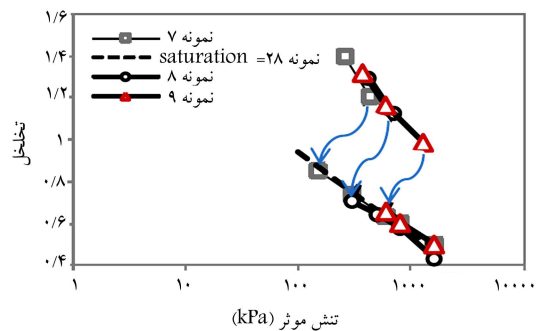
شکل ۱۹. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۱۶، ۱۷، و ۱۸.



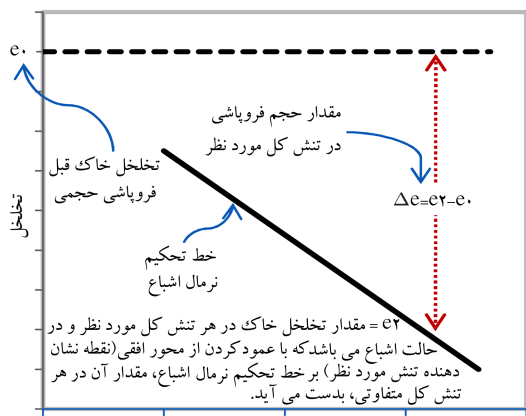
شکل ۱۵. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۴، ۵، و ۶.



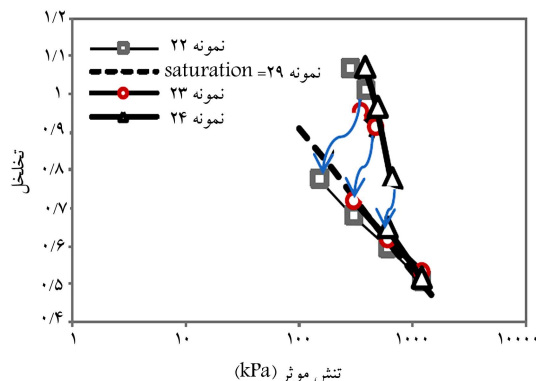
شکل ۲۰. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۱۹، ۲۰، و ۲۱.



شکل ۱۶. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۷، ۸، و ۹.



تنش خالص (kPa)



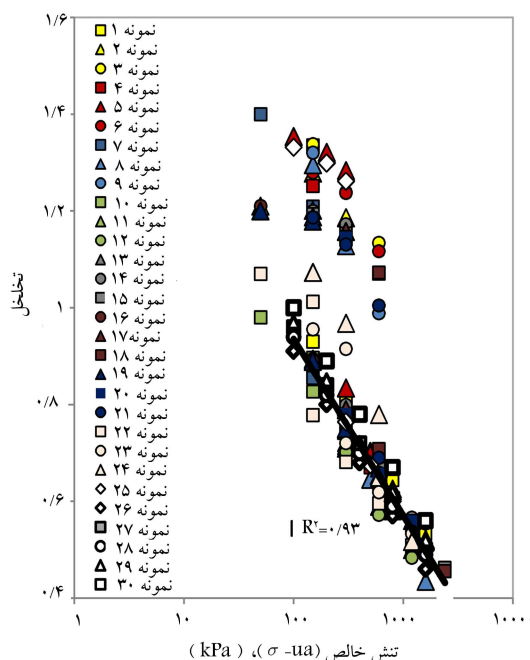
شکل ۲۱. منحنی تحکیم قبل و بعد از فروپاشی در نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴.

شکل ۲۳. منحنی NCL نمونه‌ی خاک نوعی (محور قائم میزان تخلخل و محور افقی مقدار تنش خالص در مقیاس لگاریتمی).

خاک قبل از اشباع در رفتار تحکیمی آنها پس از اشباع بی‌تأثیر است. به عبارت دیگر، همان‌گونه که در شکل ۲۳ نشان داده شده است؛ در هر شرایط غیراشباع اگر تخلخل خاک مشخص باشد، با داشتن تنش کل وارده بر توده‌ی خاک می‌توان نقطه‌ی نظیر در خط تحکیم نرمال اشباع را پیدا کرد. تفاوت تخلخل این دو نقطه، میزان فروپاشی را پیش‌بینی خواهد کرد. با عنایت به اینکه تعیین خط NCL در شرایط اشباع بسیار ساده و ارزان‌قیمت است، با استفاده از این روش به سهولت و با پیچیدگی کم می‌توان تخمین مناسبی از میزان نشست ناشی از اشباع خاک به دست آورد.

۵. نتیجه‌گیری

با استفاده از روش فیلتر کاغذی، منحنی مشخصه‌ی آب - خاک مشخص شده است. نمونه‌های خاک غیراشباع با توجه به منحنی تراکم و منحنی مشخصه‌ی آب - خاک، با شرایط اولیه‌ی متفاوتی (مکش، تخلخل، وزن مخصوص خشک، و درصد رطوبت) ساخته شدند و تحت بارگذاری در شرایط ادنومتریک قرار گرفتند و در تنش‌های اعمالی متفاوتی اشباع شدند. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، منحنی‌های NCL و پتانسیل رهمبندگی نمونه‌های خاک ترسیم شده است. براساس منحنی‌های فروپاشی، که در ازاء تنش‌های اعمالی متفاوت رسم شده، نشان داده شده است که تنش اعمالی بر توده‌ی خاک غیراشباع در میزان پتانسیل فروپاشی تأثیری دوچانه دارد؛ به طوری که اگر مقدار تنش اعمالی تا میزان معینی افزایش یابد، میزان فروپاشی بیشتر می‌شود و چنانچه تنش اعمالی از آن مقدار بیشتر شود، میزان فروپاشی نمونه‌ی خاک غیراشباع کاهش می‌یابد. همچنین در منحنی‌های فروپاشی حجمی که در ازاء وزن مخصوص خشک و رطوبت اولیه‌ی متفاوت رسم شده است، نشان داده شده است که افزایش رطوبت و وزن مخصوص خشک اولیه باعث کاهش پتانسیل رهمبندگی در خاک‌های غیراشباع می‌شود. در منحنی‌های NCL ترسیم‌شده نشان داده شده است که نمونه‌های خاک غیراشباع بعد از فروپاشی بر روی خط NCL نمونه‌ی اشباع قرار می‌گیرند؛ از این رو می‌توان با داشتن مقدار تنش کل و تخلخل در توده‌ی خاک به راحتی مقدار تغییر حجم و پتانسیل رهمبندگی خاک را پیش‌بینی و در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد.



شکل ۲۲. منحنی NCL تمامی نمونه‌ها (محور قائم میزان تخلخل و محور افقی مقدار تنش خالص بر حسب کیلوپاسکال در مقیاس لگاریتمی).

تحکیمی آنها در حالت اشباع نداشته است و نمونه‌های غیراشباع با شرایط اولیه‌ی متفاوت بعد از اشباع‌شدگی، بر روی خط تحکیم عادی خاک اشباع قرار گرفته‌اند و رفتاری مشابه با خاکی که در حالت اشباع قرار داشته است، از خود نشان داده‌اند. شکل ۲۲، نشان‌دهنده‌ی منحنی تحکیم زمان بعد از فروپاشی تمامی نمونه‌های اشباع و غیراشباع در دستگاه مختصات نیمه لگاریتمی است، که محور افقی آن تنش خالص بر حسب کیلوپاسکال و محور قائم آن، نشانگر مقادیر تخلخل نمونه‌ها در تنش خالص وارده است؛ که مطابق آن، داده‌های تحکیمی نرمال نمونه‌های خاک در حالت اشباع (نمونه‌های خاک غیراشباع بعد فروپاشی و اشباع‌شدگی و نمونه‌هایی که از اول حالت اشباع داشتند) با خطی در مقیاس لگاریتمی برازش و نشان داده شده است که همه‌ی نقاط تحکیمی در حالت اشباع بر روی یک خط با ضریب همبستگی مناسب ($R^2 = 0.93$) قرار گرفته‌اند. این نمودار نشان‌دهنده‌ی این است که تخلخل و تنش نمونه‌ها صرف‌نظر از شرایط اولیه (مکش، رطوبت، چگالی و تنش اشباع‌شدگی) روی خطی واحد قرار گرفته‌اند و شرایط اولیه‌ی نمونه‌های

منابع (References)

1. Loret, B. and Khalili, N. "A three-phase model for unsaturated soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **24**(11), pp. 893-927 (2000).
2. Chiu, C.F. and Ng, C.W.W. "A state-dependent elastoplastic model for saturated and unsaturated soils", *Geotechnique*, **53**(9), pp. 809-829 (2003).
3. Ng, C.W.W. and Chiu, A.C.F. "Laboratory study of loose saturated and unsaturated decomposed granitic soil", *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering*, **129**(6), pp. 550-559 (2003).
4. Rahardjo, H., Heng, O.B. and Leong, E.C. "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(3), pp. 421-436 (2004).
5. Kayadelen, C., Sivrikaya, O., Taskiran, T. and Guneyli, H. "Critical-state parameters of unsaturated residual clayey soil from Turkey", *Engineering Geology*, **94**(1-2), pp. 1-9 (2007).
6. Jotisankasa, A., Coop, M. and Ridley, A. "The mechanical behavior of an unsaturated compacted silty clay", *Geotechnique*, **59**(5), pp. 415-428 (2009).
7. Sheng, D. "Review of fundamental principles in modeling unsaturated soil behavior", *Journal of Computers and Geotechnics*, **38**(6), pp. 757-776 (2011).
8. Casini, F. "Deformation induced by wetting: A simple model", *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(8), pp. 954-960 (2012).
9. Yakov, M.R. "Influence of physical properties on deformation characteristics of collapsible soils", *Engineering Geology*, **92**(1-2), pp. 27-37 (2007).
10. Tadepalli, R., Rahardjo, H. and Fredlund, D.G. "Measurement of matric suction and volume change during inundation of collapsible soil", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **15**(2), pp. 115-122 (1992).
11. Bagherieh, A.R., Khalili, N., Habibagahi, G. and Ghahremani, A. "Drying response and effective stress in a double porosity aggregated soil", *J. Engineering Geology*, **105**(1-2), pp. 44-50 (2009).
12. Sudhakar, M.R. and Revanasiddappa, K. "Role of soil structure and matric suction in collapse of a compact clay soil", *J. Geotechnical Testing*, **26**(1), pp. 1-9 (2003).
13. Pereira, J.H.F. and Fredlund, D.G. "Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **126**(10), pp. 907-916 (2000).
14. Brackley, I.J.A. "Partical collapse in unsaturated expansive clay", *Proc. 5th Reg. Conf. For Africa SMFE*, pp. 23-30 (1971).
15. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. "stress state variables for unsaturated soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(1), pp. 35-53 (1995).
16. Bishop, A.W. "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad*, **106**(39), pp. 859-863 (1959).
17. Dao, V.N.T., Morris, P.H. and Dux, P.F. "On equations for the total suction and its matric and osmotic components", *Cement and Concrete Research*, **38**(11), pp. 1302-1305 (2008).
18. Cokca, E. and Tilgen, H.P. "Shear strength-suction relationship of compacted Ankara clay", *Journal of Applied Clay Science*, **49**(4), pp. 400-404 (2010).
19. Marinho, F.A.M. and Oliveira, O.M. "The filter paper method revisited", *Geotechnical Testing Journal*, **29**(3), (2005).
20. Loret, B. and Khalili, N. "An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media", *Mechanics of Materials*, **34**(2), pp. 97-116 (2002).
21. Masin, D. and Khalili, N. "A hypoplastic model for mechanical response of unsaturated soils", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, **32**(15), pp. 1903-1926 (2008).
22. Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. "A constitutive model for partially saturated soils", *Geotechnique*, **40**(3), pp. 405-430 (1990).
23. Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. "An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil", *Geotechnique*, **45**(1), pp. 35-53 (1995).
24. Popescu, M.E. "A comparison between the behavior of swelling and of collapsing soils", *Engineering Geology*, **23**(2), pp. 145-163 (1986).
25. Khalili, N., Geiser, F. and Blight, G.E. "Effective stress in unsaturated soils, a review with new evidence", *Int. J. Geomech.*, **4**(2), pp. 115-126 (2004).
26. Nuth, M. and Laloui, L. "Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, **32**(7), pp.771-801 (2008).
27. Terzaghi, K. "The shear resistance of saturated soils", *Proceedings for the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation* (1936).
28. Oquendo, W.F., Munoz, J.D. and Lizcano, A. "Influence of rotations on the critical state of soil mechanics", *Computer Physics Communications*, **182**(9), pp. 1860-1865 (2011).
29. Wood, D.M., *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge (1991).
30. Newson, T.A. "Validation of a non-associated critical state model", *Computers and Geotechnics*, **23**(4), pp. 277-287 (1998).
31. Khalili, N. and Khabaz, M.H. "A unique relationship for χ for the determination of the sheara strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, **48**(5), pp. 681-687 (1998).

32. Abelve, Y.M. "The essentials of designing and building on microporous soils", *Stroitel'naya Promyshelmast*, **10**, (1948).

33. Lu, N. and Likos, W.J., *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley and sons (2004).

34. Mabirizi, D. and Bulur, R. "A comparison of total suction measurements with thermocouple psychrometer, filter paper technique, and chilled-mirror device", *GeoHunan International Conference, Changsha-Hunan-China., ASCE*, pp. 1-6 (2009).

35. ASTM Standard D5298-94, *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

36. Hamblin, A.P. "Filter-paper method for routine measurement of field water potential", *Journal of Hydrology*, **53**(3-4), pp. 355-360 (1981).