

تأثیر رطوبت بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه خمیری

علیرضا باقریه^{۱*}، علی فارسی‌جانی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و معماری دانشگاه ملایر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات همدان

abagherieh@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۲۷

چکیده - تأثیر مکش بافتی بر رفتار برشی خاک ریزدانه از آن جهت که نقش تعیین کننده‌ای در مدلسازی ژئوتکنیکی دارد، همواره مورد توجه پژوهشگران در این زمینه بوده است. در این پژوهش به تأثیر مکش بافتی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های ریزدانه پرداخته شده است. برای مشاهده تأثیر مکش بافتی بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، نمونه‌هایی از یک خاک ریزدانه خمیری با درصد رطوبت اولیه و در نتیجه مکش‌های بافتی متفاوت، بر اساس منحنی مشخصه آب- خاک و منحنی تراکم ساخته شدند. نمونه‌های خاک بر اساس شرایط اولیه مورد نظر در جعبه دستگاه برش مستقیم به صورت استاتیکی متراکم شدند. روی نمونه‌های آماده شده، آزمایش برش مستقیم در حالت غیراشباع صورت گرفت؛ بر اساس نتایج آزمایش‌ها، منحنی تغییرات تنش برشی بر حسب جابه‌جایی افقی در تنش‌های قائم متفاوت رسم شد و درباره نتایج آن بحث شد؛ نتایج نشان داد تغییرات میزان رطوبت و در نتیجه تغییرات مکش بافتی اولیه نمونه‌های خاک، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک غیراشباع ندارد.

واژگان کلیدی: رطوبت اولیه، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، خاک خمیری، فیلتر کاغذی

۱- مقدمه

مکانیک خاک کلاسیک که بنیان گذار آن کارل ترزاقی است، بیشتر برای خاک‌ها در حالت اشباع شده پی‌ریزی شده است. تعمیم این اصول برای خاک‌های اشباع نشده یا نیمه اشباع مستلزم بیان مسائل بنیادینی است که در زیر بیان شده است [۱].

الف- رفتار تغییر حجمی خاک با تغییرات در میزان اشباع شدگی
ب- رفتار مقاومت برشی خاک با تغییرات در میزان اشباع شدگی
پ- رفتار هیدرولیکی خاک با تغییرات در میزان اشباع شدگی
در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. بر اساس آن، نتایج و مدل‌های معتبری نیز

هر روزه ساخت انواع پروژه‌ها با تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر در حال توسعه است. یکی از عوامل محدود کننده چنین پروژه‌هایی مناسب نبودن زمین محل اجرای پروژه به عنوان پی سازه است. تشخیص مناسب بودن زمین برای اجرای پی سازه بستگی به شناخت و علم مهندسی و پژوهشگران از رفتار خاک در شرایط و حالات مختلف دارد. به عبارت دیگر، پژوهشگران برای ارزیابی کیفی و کمی رفتار خاک در شرایط مختلف باید عالم بر تغییر رفتار خاک در حالت‌های مختلف است. این در حالی است که اصول

پدید آمده است. اما در برخی از مدل‌های ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران، نکات مبهم و اشکالاتی از قبیل عدم تطابق بین داده‌های آزمایشگاهی و تجربی و نیز عدم هماهنگی بین مدل‌های ارائه شده برای حالت اشباع نشده با حالت اشباع شده خاک مشاهده می‌شود که نیاز به بررسی و پرداخت بیشتر به این موضوع را نشان می‌دهد [۱]. از جمله پیشگامان پژوهش در این راستا آلونسو و همکارانش (۱۹۹۰) [۲] بودند. پژوهش آن‌ها توجه زیادی را به خودش جلب کرد. به گونه‌ای که اکنون تعداد زیادی از مدل‌های اساسی را می‌توان در منابع علمی مربوطه یافت. در چهل سال اخیر پژوهشگران زیادی به موفقیت‌هایی در این زمینه دست یافته‌اند. نتیجه کار بیشتر پژوهشگران در سه مورد زیر خلاصه شده است [۱].

الف- مباحث کلی از حالت‌های تنش و متغیرهای اساسی به کارگرفته شده برای پی‌ریزی مدل‌های متعدد
ب- تجزیه و تحلیل دقیق مدل‌های بنیادین و بررسی نقاط ضعف و قدرت آن‌ها

پ- پیشرفت در حوزه نمونه‌سازی خاک غیراشباع

در سال ۱۹۶۳، بیشاپ و بلایت [۳] توانستند رابطه‌ای مبتنی بر تنش مؤثر، برای بیان مقاومت برشی خاک‌های اشباع نشده ارائه کنند. بعد از مدتی در سال ۱۹۷۸، فردلاندر و مورگنشترن [۴] رابطه‌ای دیگر برای بیان مقاومت برشی خاک‌های اشباع نشده ارائه کردند که به گونه‌ی مناسبی مقاومت برشی ناشی از تنش مؤثر را از مقاومت برشی ناشی از تنش خالص جدا می‌کرد. در سال‌های اخیر علاقه پژوهشگران به استفاده از روش تنش مؤثر در تعیین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع گسترش زیادی یافته است [۵، ۶، ۷، ۸]. در سال ۱۹۹۸، رابطه‌ای برای بیان مقاومت برشی خاک رس غیراشباع ارائه شد که مبتنی بر تنش مؤثر، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

بود [۹]. از طرفی تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع، در ارتباط مستقیم با مقدار مکش بافتی درون خاک است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع با مکش بافتی درون خاک در ارتباط است [۹]. بنابراین تغییر در مقدار مکش بافتی خاک می‌تواند سبب تغییر در میزان تنش برشی مقاوم خاک در حالت غیراشباع، بشود. این پژوهش بر این فرض استوار است که با استفاده از اصل تنش مؤثر می‌توان رفتار برشی خاک را در حالت غیر اشباع بیان کرد، از این رو آزمایش‌هایی انجام شد تا براساس تجزیه و تحلیل نتایج آن، تأثیر تغییرات مکش بافتی درون خاک بر پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) مشخص شود. پس تعیین تأثیر مکش بافتی خاک غیراشباع بر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، از اهداف اصلی این پژوهش تلقی می‌شود. با بررسی و یافتن رابطه‌ای بین مکش بافتی درون خاک و پارامترهای مقاومت برشی آن، می‌توان گام بزرگی در شناخت رفتار خاک غیراشباع در اثر تغییرات مکش بافتی که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار خاک غیراشباع است، برداشت.

۲- تعریف مفاهیم اصلی

۲-۱- مکش خاک

نظریه مکش در خاک با مطالعه اندرکنش بین رفتار گیاهان- آب و خاک پدید آمده است. رفتار خاک‌های غیراشباع به میزان زیادی به مقدار مکش درون آن وابسته است. در مکانیک خاک غیر اشباع حالت انرژی آزاد آب درون خاک را مکش می‌نامند [۱۰]. در تعریف رایج کل بیان شده است که مکش کل حاصل جمع مکش بافتی و مکش اسمزی است. اگر مکش اسمزی وجود نداشته باشد؛ چشم‌پوشی از وسیله یا روش اندازه‌گیری، مکش کل برابر با مکش بافتی

$$\sigma' = (\sigma_{\text{net}}) + \chi(s) \quad (2-3)$$

که در آن فشار هوای منفذی، χ ضریب تنش مؤثر، s مکش خاک و σ_{net} تنش خالص است. پارامتر χ نیز با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷،۹]

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

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

۲-۳- مقاومت برشی

مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی رخ دهد [۱۸].

رابطه زیر به وسیله‌ی کارل ترزاقی (۱۹۳۶) [۱۵] برای بیان مقاومت برشی خاک رس اشباع بیان شده است.

$$\tau_f = c + (\sigma - u_w) \tan(\phi) \quad (5)$$

که در آن c چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

مقاومت برشی خاک غیر اشباع به وسیله‌ی خلیلی و خباز به صورت زیر بیان شده است [۹].

$$\tau_f = c + ((\sigma - u_a) + \chi(s)) \tan(\phi) \quad (6)$$

که در آن c چسبندگی خاک و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک است.

با توجه به رابطه ۵ می‌توان پوش گسیختگی برشی مور- کلمب را در صفحه تنش قائم مؤثر- تنش برشی نشان داد [۹].

است. به طور کلی سهم پتانسیل اسمزی در مقایسه با پتانسیل بافتی قابل چشم پوشی است [۱۱]. مکش بافتی خاک به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

که در آن s مکش بافتی درون خاک است. همچنین u_a و u_w به ترتیب بیان کننده فشار هوای حفره‌ای و فشار آب حفره‌ای است.

۲-۲- تنش مؤثر

اصل تنش مؤثر ابزاری مفید و مهم برای ارزیابی کمی واکنش‌ها، در خاک اشباع و غیر اشباع است و نقشی محوری در تدوین فرمول‌های مرتبط با مکانیک خاک ایفا می‌کند [۱۲]. تنش مؤثر در معادلات ساختاری حالت الاستیک و الاستوپلاستیک فاز جامد خاک به کار می‌رود که مرتبط با تغییر تنش نسبت به کرنش و یا هر کمیتی دیگر در ارتباط با اسکلت خاک، است [۱۳، ۱۴]. در ادامه، روابطی که برای تعریف تنش مؤثر در خاک‌های اشباع و خاک‌های غیر اشباع به کار می‌روند، ارائه شده است. تنش مؤثر برای خاک‌های اشباع به وسیله‌ی کارل ترزاقی (۱۹۳۶) [۱۵] به صورت زیر بیان شده است.

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

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

تنش مؤثر برای خاک‌های غیر اشباع این‌گونه بیان شده است [۱۶].

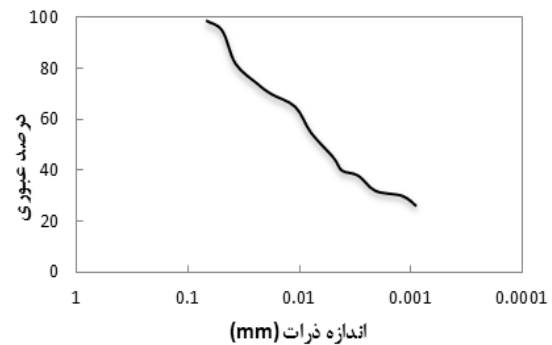
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1-3)$$

یا

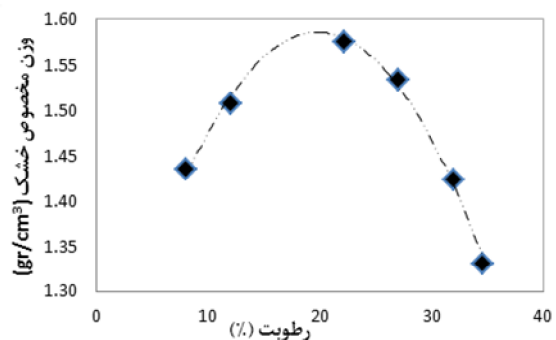
۳- برنامه آزمایش‌ها

۳-۱- مشخصات نمونه خاک مورد مطالعه

خاک مورد مطالعه، خاکی ریزدانه و دارای ذرات کوچک‌تر از الک شماره ۲۰۰ است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی دانه‌بندی و تراکم خاک را نشان می‌دهند. جدول شماره ۱ مشخصات حدود اتبرگرگ، مشخصات تراکمی و وزن مخصوص جامد خاک مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل (۱) منحنی دانه‌بندی خاک



شکل (۲) منحنی تراکم خاک

جدول (۱) مشخصات فیزیکی خاک مورد آزمایش

| | |
|------|---|
| ۲۰ | درصد رطوبت بهینه |
| ۱/۵۸ | وزن مخصوص خشک بیشترین (gr/cm ³) |
| ۵۲/۵ | حد روانی (%) |
| ۲۵ | حد خمیری (%) |
| ۲۷/۵ | نشانه خمیری (%) |
| ۲/۶۷ | چگالی ویژه ذرات خاک |

۳-۲- روش فیلتر کاغذی برای تعیین منحنی

مشخصه آب- خاک

بهترین روش برای اندازه‌گیری مقدار مکش کل درون خاک، اندازه‌گیری میزان رطوبت نسبی درون خاک است. روش فیلتر کاغذی یکی از روش‌های غیرمستقیم برای تعیین نیروی مکش خاک است؛ روش فیلتر کاغذی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در روش غیرمستقیم، از یک سه پایه پلاستیکی برای جدا کردن فیلتر کاغذی از نمونه خاک استفاده می‌شود. در این حالت از سمت نمونه 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 سه فیلتر کاغذی استفاده می‌شود؛ و با استفاده از فیلتر میانی میزان مکش اندازه‌گیری می‌شود و دو فیلتر دیگر از فیلتر میانی در برابر ذرات ریز و چسبنده خاک محافظت می‌کنند تا ذرات خاک به فیلتر میانی چسبیده نشوند. این روش برای تعیین مکش بافتی خاک کاربرد دارد [۲۰، ۱۹، ۱۰].

یکی دیگر از روش‌های متداول تعیین مکش خاک روش صفحه فشار^۱ است. تعیین مکش خاک با استفاده از روش صفحه فشار نسبت به روش فیلتر کاغذی، بسیار پر هزینه‌تر است [۲۱]. از طرفی در روش صفحه فشار بازه تغییرات مکش (با توجه به توان صفحات فشار که از ۱۰-۱۵۰۰ کیلو پاسکال است) نسبت به روش فیلتر کاغذی محدودتر است. بیشترین مقدار مکشی را که می‌توان در روش صفحه فشار اندازه‌گیری کرد، ۱۵۰۰ کیلو پاسکال است. اما در روش فیلتر کاغذی با توجه به کالیبراسیون‌ها و فرمول‌های متفاوتی که ارائه شده است؛ که این کالیبراسیون و فرمول‌ها رابطه بین رطوبت فیلتر کاغذی و مکش خاک را

1- Pressure Plate

جدول (۲) زمان لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی [۱۱]

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



شکل (۳) چگونگی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش مستقیم



شکل (۴) چگونگی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش غیرمستقیم

۳-۳- چگونگی آماده‌سازی نمونه‌ها برای برش مستقیم

ابتدا مقدار وزن لازم خاک برای ساخت نمونه با توجه به مشخص بودن حجم قالب آزمایش برش مستقیم و با در

نشان می‌دهند، می‌توان مقادیر مکشی بیشتری را تعیین کرد. تجهیزات لازم در تعیین مکش خاک با روش فیلتر کاغذی شامل ترازوی دقیق با دقت یک ده هزارم گرم، کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ و گرم‌خانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد است. فیلترهای کاغذی داخل نمونه‌های خاک مورد آزمایش طبق روشی که بیان شد، قرار گرفته و نمونه‌های خاک به مدت زمان لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی با فیلترهای کاغذی، در محیطی با دمای ثابت قرار داده می‌شوند. بعد از رسیدن به تعادل رطوبتی، فیلترهای کاغذی از نمونه‌های خاک خارج شده و با سرعت وزن می‌شوند و به این ترتیب میزان رطوبت جذب شده به وسیله فیلترهای کاغذی محاسبه می‌شود. مکش بافتی نمونه خاک مرطوب معادل مکش بافتی کاغذ صافی است. پس از رسیدن به تعادل رطوبتی، مکش بافتی کاغذ صافی بر اساس استاندارد ASTM D5298-92 با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید [۲۲].

$$\begin{cases} \text{Log}_s(\text{kPa}) = 5.327 - 0.0779w & w \leq 45.3\% \\ \text{Log}_s(\text{kPa}) = 2.412 - 0.0135w & w \geq 45.3\% \end{cases} \quad (7)$$

که در آن S مکش بافتی کاغذ صافی برحسب کیلو پاسکال و w درصد رطوبت فیلتر کاغذی است.

بازه زمانی لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی در روش فیلتر کاغذی در مقادیر مکشی کمتر از ۳۰۰۰۰ کیلو پاسکال در جدول ۲ ارائه شده است [۱۱].

بازه زمانی لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی در هر مقداری از مکش، طبق استاندارد ASTM D5298-92 هفت روز است. چنانچه بازه زمانی بیش از هفت روز باشد، نتایج مطلوب‌تری به دست می‌آید [۲۲].

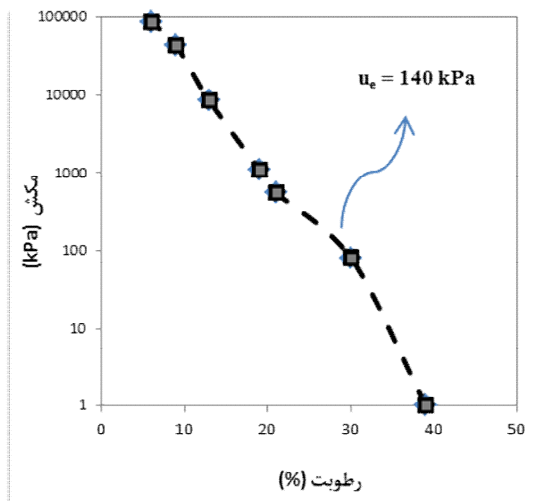
چگونگی قرارگیری فیلتر کاغذی در روش مستقیم و غیر مستقیم به ترتیب در شکل‌های شماره ۳ و ۴ نشان داده شده است.

حفره‌ای که بر اثر اعمال تنش برشی بر نمونه‌های خاک ایجاد شده بود، وجود نداشت.

۴- نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- نتایج آزمایش تعیین مکش (منحنی مشخصه آب- خاک)

برای تعیین منحنی مشخصه آب- خاک، نمونه‌های خاک با تراکم معین بازسازی شدند و فیلترهای کاغذی مانند روشی که شرح داده شد، در داخل نمونه‌ها قرار گرفتند و به مدت ۴۵ روز برای رسیدن به تعادل رطوبتی در محیطی با دمای ثابت، نگهداری شدند. برای کاهش خطا، سه گروه مشابه از نمونه‌های خاک بازسازی شدند. در هر گروه، هفت نمونه با وزن مخصوص یکسان و میزان رطوبت متفاوت بازسازی شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، بهترین منحنی که نشان دهنده رفتار مکشی خاک بود، رسم شد. شکل ۵ منحنی مشخصه آب- خاک را نشان می‌دهد.



شکل (۵) منحنی مشخصه آب-خاک

۴-۲- نتایج آزمایش برش مستقیم

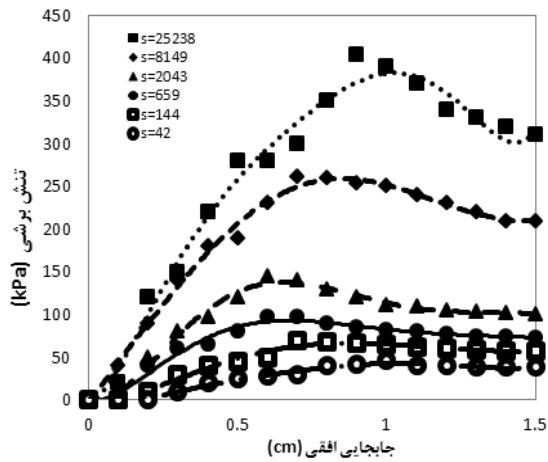
شرایط اولیه نمونه‌های خاک در آزمایش برش مستقیم، در

نظر گرفتن وزن مخصوص مشخص، تعیین شده است. در مرحله بعد با اضافه نمودن رطوبت لازم به نمونه و بعد از یکنواخت نمودن کامل، با مخلوط کردن و ورز دادن آن، نمونه خاک به مدت ۴۸ ساعت برای یکنواخت شدن رطوبت، در ظرفی سربسته نگهداری شد. در پایان نمونه درون قالب فلزی برش مستقیم ریخته و به صورت استاتیکی متراکم شد.

۳-۴- جزئیات آزمایش برش مستقیم

در این برنامه آزمایشگاهی، ۵ گروه آزمایش برش مستقیم در شرایط غیراشباع و با میزان رطوبت اولیه متفاوت، در تنش‌های قائم اعمالی مختلف انجام شد. در هر گروه، سه نمونه با شرایط اولیه یکسان (وزن مخصوص خشک، میزان رطوبت و مکش بافتی)، در سه تنش قائم اعمالی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال تحت آزمایش برش مستقیم با شرایط غیراشباع قرار گرفتند. منظور از آزمایش برش مستقیم غیراشباع در واقع همان آزمایش برش مستقیم با شرایط استاندارد و عادی است؛ با این تفاوت که در محفظه‌ای که قالب دستگاه برش مستقیم در آن قرار می‌گیرد، آب اضافه نمی‌شود و نمونه‌ها با شرایط اولیه ساخته شده، تحت آزمایش برش مستقیم قرار می‌گیرند. چگونگی انجام آزمایش‌های برش مستقیم به صورت CU (تحکیم یافته و زهکشی نشده) بوده است؛ به گونه‌ای که ابتدا نمونه‌های خاک تحت تنش قائم اعمالی تحکیم یافتند و به مدت ۴۸ ساعت تحت تنش قائم اعمالی برای زایل شدن کامل اضافه فشار آب حفره‌ای قرار گرفتند تا این که نشست نمونه‌های خاک بر اثر تنش قائم اعمالی، کامل شد. سپس با اعمال نیروی افقی، در نمونه‌های خاک تنش برشی ایجاد شد. اعمال نیروی افقی بر نمونه‌های خاک تحکیم یافته با سرعتی انجام شد که امکان زایل شدن اضافه فشار آب

نتیجه محاسبات تنش مؤثر نیز در جدول ۳ ارائه شده است.



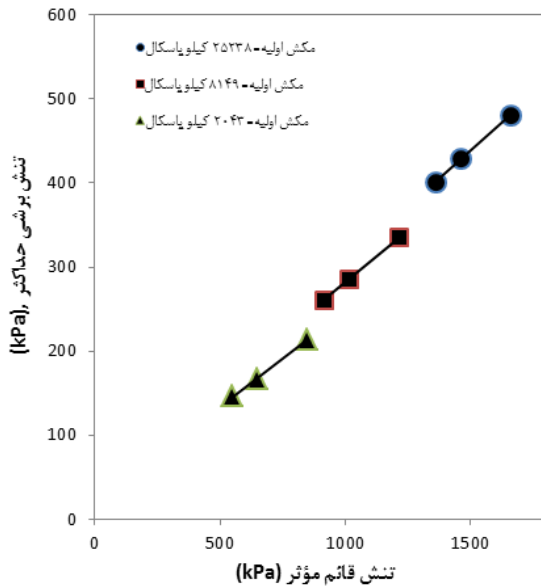
شکل (۶) منحنی تنش برشی برحسب جابه‌جایی افقی در تنش قائم اعمالی ۱۰۰ کیلو پاسکال

جدول ۳ ارائه شده است. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم به دست آمده است و مقادیر تنش برشی را برحسب جابه‌جایی افقی در تنش‌های متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل شماره ۵، مقدار مکش متناظر با حالتی که خاک از اشباع کامل خارج می‌شود (مکش ورودی هوا)، برابر با ۱۴۰ کیلو پاسکال است که با استفاده از مقدار آن، ضریب تنش مؤثر خاک (χ) در هر مکش مشخصی، محاسبه می‌شود. با توجه به معین بودن مقادیر تنش قائم اعمالی بر روی نمونه‌های خاک، ضریب تنش مؤثر، میزان رطوبت اولیه آنها و همچنین منحنی مشخصه آب خاک، مقادیر تنش قائم مؤثر با توجه به فرمول ارائه شده در رابطه شماره ۳ قابل محاسبه است.

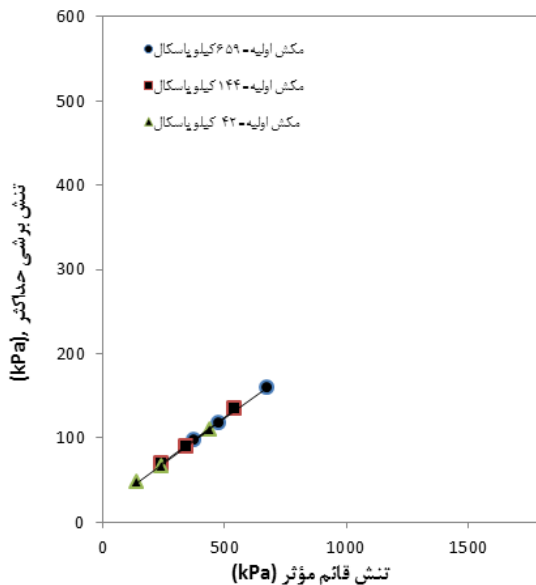
جدول (۳) مشخصات اولیه نمونه‌های خاک

| شماره نمونه | وزن مخصوص خشک (gr/cm^3) | میزان رطوبت (%) | تنش قائم اعمالی (kPa) | S مکش اولیه (kPa) | χ | تنش قائم مؤثر (kPa) | درجه اشباع (%) |
|-------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|--------|---------------------|----------------|
| ۱ | ۱/۳ | ۱۰ | ۱۰۰ | ۲۵۲۳۸ | ۰/۰۵ | ۱۳۶۱/۹ | ۲۵ |
| ۲ | ۱/۳ | ۱۰ | ۲۰۰ | ۲۵۲۳۸ | ۰/۰۵ | ۱۴۶۱/۹ | ۲۵ |
| ۳ | ۱/۳ | ۱۰ | ۴۰۰ | ۲۵۲۳۸ | ۰/۰۵ | ۱۶۶۱/۹ | ۲۵ |
| ۴ | ۱/۳ | ۱۲ | ۱۰۰ | ۸۱۴۹ | ۰/۱ | ۹۱۴/۹ | ۳۰ |
| ۵ | ۱/۳ | ۱۲ | ۲۰۰ | ۸۱۴۹ | ۰/۱ | ۱۰۱۴/۹ | ۳۰ |
| ۶ | ۱/۳ | ۱۲ | ۴۰۰ | ۸۱۴۹ | ۰/۱ | ۱۲۱۴/۹ | ۳۰ |
| ۷ | ۱/۳ | ۱۵ | ۱۰۰ | ۲۰۴۳ | ۰/۲۲ | ۵۴۹/۴ | ۳۸ |
| ۸ | ۱/۳ | ۱۵ | ۲۰۰ | ۲۰۴۳ | ۰/۲۲ | ۶۴۹/۴ | ۳۸ |
| ۹ | ۱/۳ | ۱۵ | ۴۰۰ | ۲۰۴۳ | ۰/۲۲ | ۸۴۹/۴ | ۳۸ |
| ۱۰ | ۱/۳ | ۱۸ | ۱۰۰ | ۶۵۹ | ۰/۴۲ | ۳۷۶/۷ | ۴۵ |
| ۱۱ | ۱/۳ | ۱۸ | ۲۰۰ | ۶۵۹ | ۰/۴۲ | ۴۷۶/۷ | ۴۵ |
| ۱۲ | ۱/۳ | ۱۸ | ۴۰۰ | ۶۵۹ | ۰/۴۲ | ۶۷۶/۷ | ۴۵ |
| ۱۳ | ۱/۳ | ۲۳ | ۱۰۰ | ۱۴۴ | ۰/۹۸ | ۲۴۱/۱۲ | ۵۸ |
| ۱۴ | ۱/۳ | ۲۳ | ۲۰۰ | ۱۴۴ | ۰/۹۸ | ۳۴۱/۱۲ | ۵۸ |
| ۱۵ | ۱/۳ | ۲۳ | ۴۰۰ | ۱۴۴ | ۰/۹۸ | ۵۴۱/۱۲ | ۵۸ |
| ۱۶ | ۱/۳ | ۲۸ | ۱۰۰ | ۴۲ | ۱ | ۱۴۲ | ۷۱ |
| ۱۷ | ۱/۳ | ۲۸ | ۲۰۰ | ۴۲ | ۱ | ۲۴۲ | ۷۱ |
| ۱۸ | ۱/۳ | ۲۸ | ۴۰۰ | ۴۲ | ۱ | ۴۴۲ | ۷۱ |

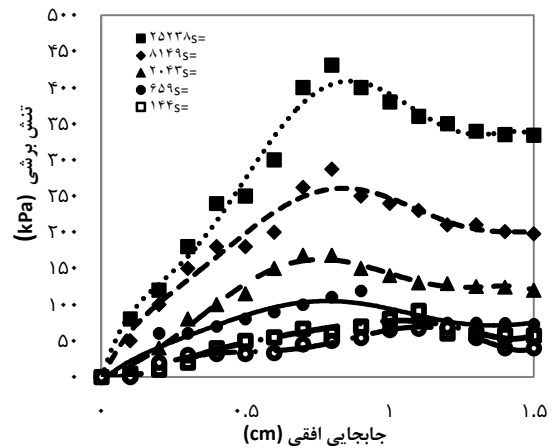
مستقیم که در شکل های ۶ تا ۸ ارائه شده است، پوش گسیختگی مور- کلمب به صورت تنش برشی بیشینه در برابر تنش قائم مؤثر در شکل های ۹ و ۱۰ ترسیم شده است. شکل ۹ مربوط به نمونه های دارای مکش زیاد و شکل ۱۰ مربوط به مکش های کم است.



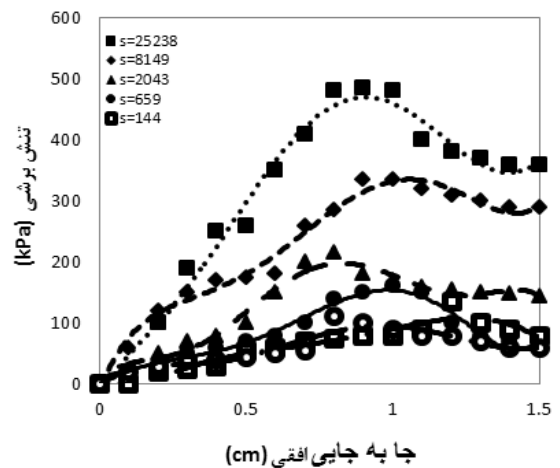
شکل (۹) تغییرات تنش برشی حداکثر نسبت به تنش قائم مؤثر



شکل (۱۰) تغییرات تنش برشی بیشینه نسبت به تنش قائم مؤثر



شکل (۷) منحنی تنش برشی بر حسب جابه جایی افقی در تنش قائم اعمالی ۲۰۰ کیلو پاسکال

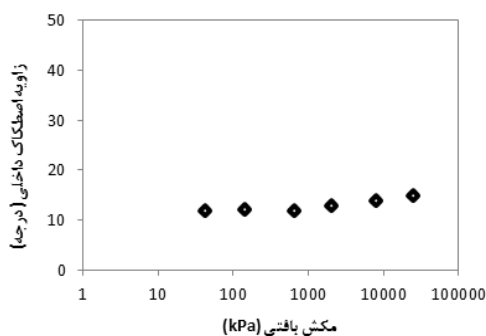


شکل (۸) منحنی تنش برشی بر حسب جابه جایی افقی در تنش قائم اعمالی ۴۰۰ کیلو پاسکال

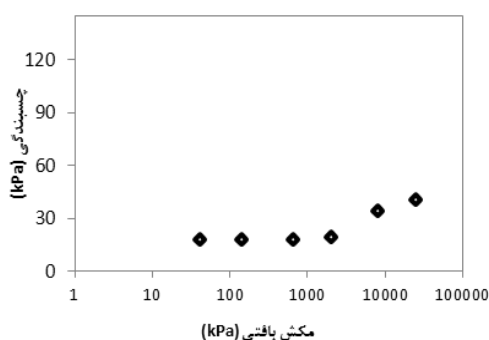
با توجه به شکل های ۶ تا ۸ مشاهده می شود که در یک تنش قائم اعمالی یکسان، هرچه میزان مکش اولیه خاک بیشتر باشد، مقاومت برشی بیشینه آن بیشتر است و هرچه نمونه خاک به حالت اشباع نزدیکتر می شود، مقدار تنش برشی بیشینه آن نیز کاهش می یابد. به عبارت دیگر با کاهش مکش بافتی درون خاک و افزایش درجه اشباع، مقاومت برشی نمونه خاک کاهش می یابد.

بر اساس تنش های برشی بیشینه در آزمایش های برش

کاهش جزئی زاویه اصطکاک داخلی اندازه‌گیری شده، با کاهش مکش را می‌توان به این موضوع نسبت داد که در مکش‌های کمتر به علت افزایش میزان رطوبت، اضافه فشار آب حفره‌ای بوجود آمده در اثر برش بیشتر شده و موجب کاهش مختصر زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود.



شکل (۱۱) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برحسب مقادیر مختلف مکش اولیه نمونه‌های خاک



شکل (۱۲) تغییرات چسبندگی برحسب مقادیر مختلف مکش اولیه نمونه‌های خاک

در شکل ۱۲ و جدول شماره ۵ نیز تغییرات چسبندگی در نمونه‌های دارای مکش‌های اولیه متفاوت ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در مکش‌های متوسط (بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلوپاسکال)، تغییرات مکش بیشترین تأثیر را بر روی پارامتر چسبندگی خاک داشته و در تنش‌های کم (بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلو پاسکال)، تغییرات مکش کمترین تأثیر را بر روی پارامتر چسبندگی خاک داشته است و همانند زاویه اصطکاک داخلی، می‌توان اظهار داشت که چسبندگی نیز تأثیر قابل

معادله خطوط ارائه شده در شکل‌های ۹ و ۱۰، برحسب مقادیر مکش اولیه نمونه‌ها، در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول (۴) معادلات خطوط ارائه شده در شکل‌های ۹ و ۱۰

| مقدار مکش اولیه (kPa) | معادله خط |
|-----------------------|-----------------------------------|
| ۲۵۲۳۸ | $\tau = (.265 \times s) + 40.096$ |
| ۸۱۴۹ | $\tau = (.2471 \times s) + 34.60$ |
| ۲۰۴۳ | $\tau = (.2291 \times s) + 19.08$ |
| ۶۵۹ | $\tau = (.2097 \times s) + 18.02$ |
| ۱۴۴ | $\tau = (.2143 \times s) + 17.76$ |
| ۴۲ | $\tau = (.2093 \times s) + 17.71$ |

با مقایسه رابطه ۶ و معادلات ارائه شده در جدول شماره ۴، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به دست آمد. نتایج آن در جدول شماره ۵، ارائه شده است.

جدول (۵) پارامترهای مقاومت برشی در مکش‌های اولیه متفاوت

| مکش خاک (kPa) | چسبندگی (kPa) | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) | درجه اشباع (%) | میزان رطوبت (%) |
|---------------|---------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| ۲۵۲۳۸ | ۴۰/۰۹ | ۱۴/۸۴ | ۲۵ | ۱۰ |
| ۸۱۴۹ | ۳۴/۶۰ | ۱۳/۸۷ | ۳۰ | ۱۲ |
| ۲۰۴۳ | ۱۹/۰۸ | ۱۲/۹۰ | ۳۸ | ۱۵ |
| ۶۵۹ | ۱۸/۰۲ | ۱۱/۸۴ | ۴۵ | ۱۸ |
| ۱۴۴ | ۱۷/۷۶ | ۱۲/۰۹ | ۵۸ | ۲۳ |
| ۴۲ | ۱۷/۷۱ | ۱۱/۸۳ | ۷۱ | ۲۸ |

با توجه به جدول شماره ۵ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در مقادیر مکش زیاد، زاویه اصطکاک داخلی خاک تا حدودی تابع تغییرات مکش اولیه خاک است و دامنه تغییرات آن جزئی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مقادیر مکشی زیاد، زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزایش مکش تا حد کمی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه رطوبت اولیه نمونه خاک افزایش یابد و درجه اشباع خاک بیشتر شود و در نتیجه مقدار مکش اولیه نمونه‌ها کاهش یابد، مقدار زاویه اصطکاک داخلی آن کاهش می‌یابد. علت

- [5] Fleureau, J.M., Kheirbek-Saoud, S., Taibi, S.; "Experimental aspects and modelling the behaviour of soils with a negative pressure"; Proc. 1st Intl Conf. Unsaturated Soils, Paris, pp.57-62, 1995.
- [6] Oberg, A. L., Sallfors, G.A.; "rational approach to the determination of the shear strength parameters of unsaturated soils"; Proc. 1st Intl Conf. Unsaturated Soils, Paris, pp.151-158, 1995.
- [7] Bolzon, G., Schrefler, A., Zienkiewicz, O. C.; "Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states"; Geotechnique, 46, No. 2, pp. 279-289, 1996.
- [8] Khalili, N. and Khabbaz, M. H.; "The effective stress concept in unsaturated soils"; Report No. R-360. Sydney: The University of New South Wales, 1996.
- [9] Khalili, N., Khabbaz, M. H.; "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils"; Geotechnique; 48, No. 5, pp.681-687, 1998.

[۱۰] یشربی، سید شهاب الدین؛ میرزایی، علی؛ "مکانیک خاک های غیراشباع"؛ انتشارات سیمای دانش؛ چاپ اول، ۱۳۸۶.

- [11] Fernando, A. M. Marinho., Orlando, M. Oliveira.; "The Filter Paper Method Revisited"; Geotechnical Testing Journal; Vol. 29, No. 3, Paper ID. GTJ14125, 2005.
- [12] Khalili, N., Habte, M. A., Zargarbashi, S.; "A fully coupled flow deformation model for cyclic analysis of unsaturated soils including hydraulic and mechanical hysteresis"; Journal of Computers and Geotechnics; pp.872-889, 2008.
- [13] Khalili, N., Geiser, F., Blight, G. E.; "Effective stress in unsaturated soils"; review with new evidence. Int J Geomechanics, 4(2):115-26, 2004.
- [14] Nuth, M., Laloui, L.; "Effective stress concept in unsaturated soils"; clarification and validation of a unified framework. Int J Numer Anal Meth Geomech;32:771-801, 2008.
- [15] Terzaghi, K.; "The shear resistance of saturated soils"; Proceedings for the 1st. International Conference on soil Mechanics and Foundation, 1936.

توجهی از شرایط اولیه نمونه های خاک نمی پذیرد و از دیدگاه ژئوتکنیکی می توان از این تغییرات چشم پوشی کرد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش برای تعیین منحنی مشخصه آب-خاک از روش فیلتر کاغذی استفاده شد. نمونه ها با رطوبت های اولیه متفاوت در شرایط غیراشباع تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. تنش مؤثر در رطوبت های مختلف با داشتن مکش از رابطه خلیلی و خباز (۱۹۹۸) [۹] محاسبه شد. نتایج بیانگر این است که مقادیر پارامترهای مقاومتی اندازه گیری شده در رطوبت های مختلف با یکدیگر تفاوت قابل توجهی ندارند. یکی از عوامل ایجاد تغییرات در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک را می توان به اضافه فشار آب حفره ای مختصر وجود آمده حین برش نمونه ها نسبت داد. نتایج این پژوهش مؤید اعتبار اصل تنش مؤثر در خاک های غیراشباع است؛ به عبارت دیگر اگر تخمین مناسبی از میزان تنش مؤثر در دست باشد، نیازی به اندازه گیری پارامترهای مقاومتی در شرایط غیراشباع وجود ندارد و پارامترهای حالت اشباع کماکان در این حالت نیز معتبر و قابل استفاده است.

۶- مراجع

- [1] Sheng, D.; "Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behavior"; Computers and Geotechnics; 38, pp.757-776, 2011.
- [2] Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A.; "A constitutive model for partially saturated soils" Geotechnique; 40, pp.405-430, 1990.
- [3] Bishop, A.W., Blight G.E.; "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils"; Geotechnique; 13, pp.177-197, 1963.
- [4] Fredlund, D.G., Morgenstern N.R., Widger A.; "Shear strength of unsaturated soils"; Can. Geotech. J; 15, pp.313-321, 1978.

- [20] Chander, R. J., Gutierrez, C.I.; "The filter paper method of suction measurement"; Technical notes, Imperial college of science and university, 1986.
- [21] Hamblin, A.P.; "Filter-paper method for routine measurement of field water potential"; Journal of Hydrology, 53: 355-360, 1981.
- [22] ASTM D5298-92; "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper"; American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia 15.09, 156-161, 1992.
- [16] Bishop, A. W.; "The principle of effective stress"; TekniskUkeblad 106, pp.859-863, 1959.
- [17] Bagherieh, A. R., Khalili, N., Habibagahi. G., Ghahremani. A.; "Drying response and effective stress in a double porosity aggregated soil". Engineering Geology; vol. 105, pp. 44-50, 2009.
- [18] Braja, M. Das.; "Principles of geotechnical engineering"; Fifth Edition, 2006.
- [19] Ning, Lu., William, J.Likos.; "Unsaturated soil mechanics"; John Wiley and sons, 2004.

The effect of moisture content on the shear strength parameters of plastic fine soils

A.R. Bagherieh^{1*}, A. Farsijani²

1- Assistant Professor, School of Civil Engineering

2- M.Sc. Graduated Student, Islamic Azad University

abagherieh@yahoo.com

Abstract:

The effect of matric suction on shear strength of soil, because of its dominant role in geotechnical modelling, has received the attention of researchers in this field. This research is focused in investigating the effect of matric suction on shear strength of a fine soil. The physical properties of the soil are determined. All samples are passed through No. 200 sieve. The soil is a high plasticity soil which is classified CH according to the unified classification system. The filter paper method is performed to extract the soil water characteristic curve. In addition to its simplicity, one of the major advantages of this method is the vast range of suctions can be measured by it. Specimens were compacted at identical void ratio with different water contents. Suctions are inferred from empirical relations that relate the suction to the measured moisture content of filter paper which has been in contact with soil sample. Air entry suction is determined 140 kPa from SWCC curve. In order to examine moisture content effects on shear strength parameters (cohesion and friction angle) of the clay, soil samples are prepared with different moisture content and consequently different matric suctions with respect to soil water characteristic curve. The specimens with different initial moisture contents are statically compacted at dry density of 1.3 gr/cm³ into direct shear test mould. The moisture contents of samples are in the range of 10 to 28 percent. Hence, according to soil water characteristic curve the initial matric suctions are between 42 to 25238 kPa. Direct shear tests are conducted in unsaturated state. After applying vertical stress the samples are left at least for 48 hours to allow the equalization of internal stresses. Based on experimental data the shear stress is plotted against horizontal displacement in different vertical stresses and moisture contents and the results are analysed and discussed. The effective stress equation proposed by Bishop (1959) is used to interpret the results. The effective stress parameter χ in each moisture content is calculated by the equation suggested by Khalili & Khabbaz (1998) using the air entry suction extracted from SWCC curve. The results reveal that strength parameters do not substantially change at different moisture contents. The negligible changes in strength parameters may be attributed to slight changes in pore water pressure during shearing experiment. Such changes in pore pressure during shearing would be eliminated in constant suction consolidated drained experiments. The results of this paper support the validity of effective stress concept in unsaturated soils. In other words, with a proper estimate of effective stress, the saturated parameters are valid in unsaturated state and it is not necessary to measure strength parameters in unsaturated state. The unsaturated geotechnical experiments are time consuming and expensive and need special equipment and skills. The method proposed in this paper has a good degree of accuracy. Therefore it can decrease the costs of geotechnical investigation projects in arid lands.

Keywords: Initial water content, cohesion, internal friction angle, plastic soil, filter paper method