

تأثیر سیلت در خصوصیات رطوبتی ماسه غیر اشباع

هادی علی اشرفی^۱ و کاظم بدو^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران- خاک و پی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه
^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه

چکیده

امروزه با توجه به برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی، ضخامت قشر غیر اشباع خاک‌ها همواره در حال افزایش است. تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های غیر اشباع برای ارزیابی رفتار آنها ضروری است. از جمله این خصوصیات، ظرفیت نگه‌داشت آب و ضریب نفوذپذیری در مکش‌های کالبدی مختلف خاک است که با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین می‌شود. در این تحقیق یک دستگاه شامل محفظه فشاری قابل توزین به همراه سیستم کنترل فشار طراحی و ساخته شد که با استفاده از آن، اثر ناخالصی خاک ریزدانه سیلت در خصوصیات رطوبتی ماسه غیر اشباع بررسی گردید. آزمایش‌های اعمال مکش کالبدی برای ترکیب خاک ماسه با دو نوع خاک سیلته با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ انجام شدند. منحنی‌های مشخصه رطوبتی آزمایشگاهی، با استفاده از نرم‌افزار RETC تحلیل گردیده و با منحنی‌های حاصل از مدل‌های نظری برازش گردیدند. نتایج خوب بین منحنی‌های مشاهده‌ای و نظری مکش- درصد رطوبت، نشانگر صحت روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نظری به کار گرفته شده بود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد سیلت به خاک ماسه، میزان نگه‌داشت آب در خاک به ازای مکش مشخص افزایش محسوس می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر بافت خاک است. با مقایسه درصد‌های رطوبت حجمی در مکش‌های ۱۰ الی ۹۰ کیلو پاسکال بین خاک‌های سیلته، مشخص گردید اندازه ذرات دانه‌ها عامل مهم و تأثیرگذار در منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک‌ها و خصوصیات هیدرولیکی نمونه‌های ماسه- سیلته غیر اشباع می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ماسه، سیلت، دستگاه محفظه فشاری، مکش کالبدی، رطوبت، نفوذپذیری غیر اشباع.

۱- مقدمه

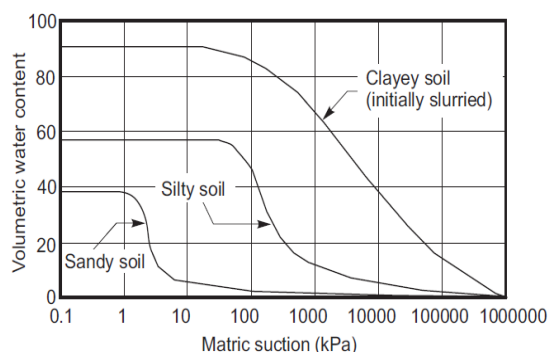
۲۰۰۲). درجه اشباع نیز تأثیر اساسی روی تنش مؤثر می‌گذارد و این تنش در سطح وسیعی برای پیش‌بینی گسیختگی با نشست شالوده‌ها استفاده می‌گردد (Motahari و Heshmati, ۲۰۱۵). عوامل متعددی روی خصوصیات آب- خاک تأثیر می‌گذارند. این عوامل عبارتند از ساختار خاک، پیوستگی خاک، درصد رطوبت اولیه تراکمی، نسبت تخلخل، نوع خاک، بافت خاک، کانی‌های خاک، تاریخچه تنش، روش تراکم و غیره (Vanapalli و همکاران، ۱۹۹۹). از مفیدترین و پرکاربردترین ابزارهای تفسیری و ادراکی برای پیش‌بینی و شناخت رفتار و خصوصیات خاک‌های غیر اشباع به طور مستقیم و غیر مستقیم، منحنی مشخصه رطوبتی خاک^۱ است که ارتباط بین مکش کالبدی خاک و درصد رطوبت خاک را بیان می‌کند. منحنی مشخصه رطوبتی، یکی از اساسی‌ترین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های غیر اشباع است که برای تخمین مقاومت برشی، روابط تنش- کرنش و نفوذپذیری خاک‌های غیر اشباع استفاده می‌شود. (Abdul و همکاران، ۲۰۰۹؛ Barbour, ۱۹۹۸؛ Assouline و همکاران، ۲۰۰۶؛

امروزه در اثر تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌های جوی و برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی افت محسوس داشته است. این پدیده باعث شده است که قشر ضخیمی از لایه‌های زیرسطحی خاک در حالت غیر اشباع قرار گرفته و رفتار ژئوتکنیکی متفاوتی نسبت به قشر اشباع داشته باشد. مطالعات روی خاک‌های غیر اشباع به دلیل صرف وقت و هزینه بیشتر نسبت به خاک‌های اشباع، کمتر انجام می‌پذیرد و به همین دلیل، رفتار واقعی خاک‌ها در ناحیه غیر اشباع خاک به طرز صحیحی ارزیابی نمی‌شود (Fredlund و Rahardjo, ۱۹۹۳).

مکش کالبدی^۱ از جمله مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در بحث خاک‌های غیر اشباع است. مکش به علت وجود هوا در خاک ایجاد می‌شود و با درصد رطوبت خاک رابطه عکس دارد. مکش با غیر اشباع‌تر شدن خاک، افزایش می‌یابد و در اغلب پارامترها و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک اثرگذار است (Miller و همکاران،

۲-۲- اثر نوع خاک در منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها

به طور کلی با ریزتر شدن ذرات خاک، ظرفیت تحمل نگهداشت آب در خاک به ازای مکش مشخص افزایش می‌یابد. فردلانند^۷ تأثیر نوع خاک در تیپ منحنی مشخصه خاک‌ها را در شکل (۲) نشان داد. همان طوری که در شکل مشخص است با ریزتر شدن خاک از ماسه به رس، مکش ورودی هوا افزایش می‌یابد.



شکل ۲- تیپ منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه

۳-۲- مدل‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک

با توجه به دشواری اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، صرف وقت و هزینه زیاد، مدل‌هایی برای پیش‌بینی میزان رطوبت از روی پتانسیل مکش توسط محققین متعددی ارائه شده است. مدل‌های بروکز- کوری^۸ و وان‌گنوختن^۹ روش‌های رایج‌تری برای به دست آوردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌باشند (Abdul و همکاران، ۲۰۰۹).

Brooks و Corey (۱۹۶۴)، معادله‌ی نمایی طبق رابطه (۱) را برای نگاه‌داشت رطوبتی خاک پیشنهاد نمودند.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(ah)^{-\lambda} \quad (1)$$

که در آن θ درصد رطوبت در مکش h ، θ_r درصد رطوبت پسماند، θ_s درصد رطوبت اشباع و a عکس مکش ورود هوا نامیده می‌شود. λ ضریبی است که از طریق برازش داده‌های مکش و درصد رطوبت حجمی به دست می‌آید.

Van Genuchten (۱۹۸۰)، برای توصیف منحنی رطوبت خاک در کل محدوده مکش، معادله (۲) را پیشنهاد نمود.

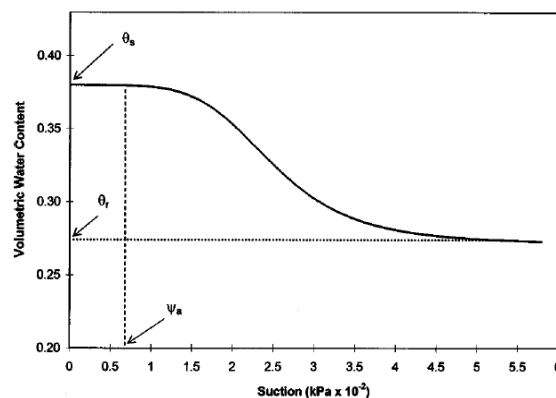
Wheeler و همکاران، ۱۹۹۶؛ Fredlund و همکاران، ۱۹۹۶؛ Mualem و همکاران، ۱۹۷۶؛ Heshmati و Motahari، ۲۰۱۵.

در تحقیق حاضر، برای بررسی تأثیر خاک‌های ریزدانه سیلتی بر مقدار مکش و ظرفیت نگه‌داشت آب روی خاک‌های ماسه‌ای، منحنی مشخصه‌های رطوبتی آزمایشگاهی خاک ماسه فیروزکوه در ترکیب با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از دو نوع خاک سیلتی با نشانه خمیری و اندازه دانه‌های متفاوت، به دست آمد. با تحلیل و بررسی منحنی‌های مشخصه رطوبتی این نمونه‌ها، می‌توان رفتار خاک‌های ماسه سیلتی غیر اشباع موجود در طبیعت و یا مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی را دقیق‌تر تحلیل نمود. بدین منظور در راستای انجام این مطالعه، دستگاه محفظه فشار قابل توزین^۳ برای به دست آوردن منحنی مشخصه‌های رطوبتی آزمایشگاهی خاک، طراحی و ساخته شد.

۲-۲- ارتباط مکش و درصد رطوبت خاک

۱-۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی تیپ خاک‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. پارامترهای مهم و کاربردی مشخص شده عبارتند از مکش ورودی هوا^۴ (Ψ_a)، درصد رطوبت پسماند^۵ (θ_r) و درصد رطوبت در بیشترین درجه اشباع^۶ (θ_s).



شکل ۱- منحنی مشخصه رطوبتی تیپ خاک‌ها

آزمایش تعیین منحنی مشخصه می‌بایست تماماً در محدوده مکشی باشد که انتظار می‌رود خاک در صحرا آن را تجربه کند. در کل، افزایش مکش بایستی تا زمانی ادامه یابد که دیگر تغییری در درجه رطوبت خاک (درجه رطوبت پسماند) حاصل نشود. مقدار این مکش وابسته به دانه‌بندی خاک است.

7. Fredlund
8. Brooks and corey
9. Van genuchten

3. Tempe pressure cell
4. Air-entry suction
5. Residual water content
6. Saturated water content

با استفاده از معادله بروکز-کوری در مدل معلم، خواص هدایت هیدرولیکی خاک‌های غیر اشباع از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$k(h) = \frac{k_s}{(\alpha h)^{\lambda(l+2)+2}} \quad (۶)$$

۳- طراحی و ساخت دستگاه Tempe Pressure Cell

دستگاه محفظه قابل توزین، بر مبنای روش انتقال محور^{۱۰} کار می‌کند؛ یعنی به طور مستقیم مکش کالبدی را از طریق افزایش فشار هوا کنترل می‌کند. فشار آب مقدار منفی بالایی نداشته و این موضوع از کاویتاسیون در آب جلوگیری می‌کند (Hilf, ۱۹۵۶). با استفاده از این دستگاه می‌توان آزمایش را از مکش کالبدی کمتر به بالاتر و با اندازه‌گیری آب خروجی از نمونه به طور متوالی، انجام داد (Nam و همکاران، ۲۰۰۹). دستگاه محفظه قابل توزین معمولاً برای مکش‌های کالبدی تا ۱۰۰ kPa استفاده می‌گردد (Fredlund و Rahardjo، ۱۹۹۳).

به منظور دست یافتن به منحنی‌های مشخصه رطوبتی-مکش خاک‌ها در این تحقیق، دستگاه محفظه فشار قابل توزین طراحی و ساخت شد. این دستگاه به سه قسمت اصلی تقسیم می‌گردد: محفظه‌های فوقانی و تحتانی از جنس پلکسی گلس^{۱۱}، سیلندر برنجی^{۱۲} که نمونه مورد آزمایش را در خود نگه می‌دارد و صفحه سرامیکی متخلخل^{۱۳} واقع در محفظه تحتانی و در تماس مستقیم با نمونه تمامی اجزاء این دستگاه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- اجزاء و قطعات دستگاه محفظه فشار قابل توزین

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (۲)$$

در معادله فوق n و m ضرایب تجربی بوده و سایر متغیرها در روابط قبلی توضیح داده شده‌اند.

۲-۴ روش‌های غیر مستقیم تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع

بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی مرتبط با خاک‌های غیر اشباع از قبیل پایداری شیب‌ها، سدهای خاکی، لاینرهای رسی، انتقال آلاینده‌ها و موارد دیگر، نیازمند دانستن نفوذپذیری غیر اشباع خاک‌ها هستند (Goh و همکاران، ۲۰۱۵). دانستن خصوصیات هیدرولیکی خاک همچنین برای حل بسیاری از مسائل مدیریت آب و خاک مرتبط با کشاورزی، اکولوژی و موارد زیست‌محیطی واجب و ضروری است. خصوصیات هیدرولیکی خاک، فاکتورهای کلیدی برای کنترل جریان آب زیرزمینی می‌باشد (Varija و Shwetha، ۲۰۱۵).

تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع با روش‌های آزمایشگاهی یا صحرایی وقت‌گیر و پرهزینه است. به علاوه، تغییرات آن از نقطه‌ای به نقطه دیگر شدید بوده و جهت حصول به نتایج دقیق اندازه‌گیری‌های زیادی مورد نیاز است. Burdine (۱۹۵۳)، مدلی مطابق رابطه (۳)، برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع با توجه به مدل وان گنوختن پیشنهاد نمود.

$$(۳) \quad k(h) = \frac{1 - (\alpha h)^{n-2} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha h)^n]^{ml}}$$

در معادله فوق l ، شاخص پیوستگی منافذ خاک است. سایر متغیرها در روابط قبلی توضیح داده شده‌اند. با تلفیق معادله بروکز-کوری با مدل بوردین، خواص هیدرولیکی غیر اشباع خاک از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

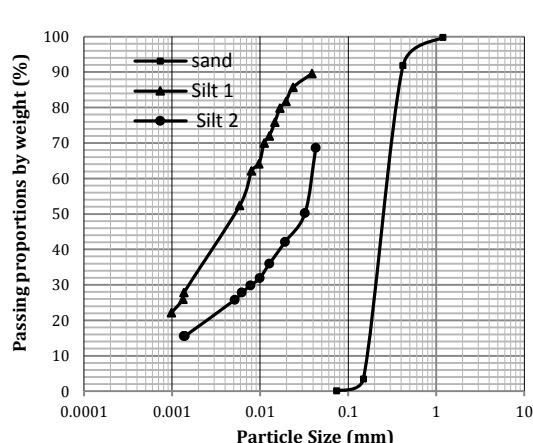
$$(۴) \quad k(h) = \frac{k_s}{(\alpha h)^{\lambda+3}}$$

در این راستا، Mualem (۱۹۷۶)، برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، با توجه به مدل وان گنوختن، رابطه (۵) را ارائه نمود:

$$(۵) \quad k(h) = \frac{k_s [1 - (\alpha h)^m] [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha h)^n]^{ml}}$$

12. Brass Cylinder
13. Porous Ceramic Plate

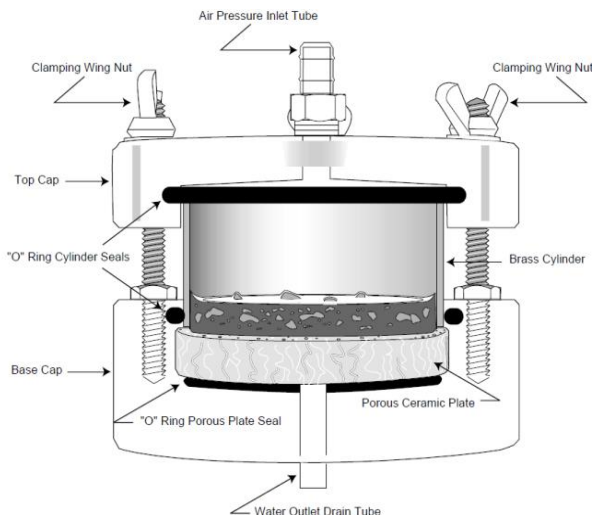
10. Axis-translation technique
11. Plexiglass



شکل ۵- منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده

۲-۴- آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه رطوبتی

در ابتدا محدوده اعمال مکش و مقدار ورودی هوای دیسک سرامیکی باتوجه به دانه‌بندی نمونه‌های خاک مشخص گردید. دیسک سرامیکی پس از اشباع شدن به مدت ۲۴ ساعت در داخل محفظه پایین تعبیه شده و سیلندر با فشار مطلوب به داخل محفظه پایین هدایت شد و توسط واشر لاستیکی^{۱۴} در جای خود به طور ثابت قرار گرفت. نمونه به وزن حدود ۳۷۰ گرم و ارتفاع ۳cm در داخل سیلندر تعبیه شد. پس از تعبیه خاک داخل سیلندر و قراردادن توری، کاغذهای صافی، صفحه متخلخل آلومینیمی و فنر، سرپوش فوقانی به بدنه متصل گردید و وزن دستگاه ثبت شد. برای اشباع نمودن خاک، محفظه پایین به مخزن آب مقطری که توسط پمپ خلاء هواگیری شده بود، متصل گردید. سپس آب با فشار هوای ۵۰kPa وارد محفظه پایین شده، پس از عبور از دیسک سرامیکی و نمونه خاک داخل سیلندر، از سرپوش فوقانی خارج شده و بعد از گذشت مدت زمانی بسته به نفوذپذیری خاک، موجب اشباع شدن خاک گردید. سپس دستگاه مجدداً توزین شده و اولین داده وزنی آزمایش در بیشترین درجه اشباع نمونه ثبت گردید. دستگاه حاوی نمونه خاک اشباع روی میز کنترل فشار هوا قرار داده شده و اولین فشار هوا به میزان ۱۰kPa توسط کوپلینگ^{۱۵} تعبیه شده در سرپوش فوقانی به نمونه وارد شد. این فشار تا زمان رسیدن خاک به تعادل هیدرولیکی (توقف زهکشی آب از پایین خاک) به نمونه وارد شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت و رسیدن به تعادل هیدرولیکی، دستگاه از مسیر زهکشی جدا شده و توزین شد. این مراحل تا فشار ۹۰kPa ادامه یافت تا تمامی نقاط آزمایشگاهی منحنی مشخصه رطوبتی به دست آید. شکل (۶) دستگاه محفظه فشاری قابل توزین را روی پانل کنترل فشار هوا در حین انجام آزمایش تعیین



شکل ۴- طرح شماتیک دستگاه محفظه فشار قابل توزین

شکل (۴) نمای شماتیکی از مقطع عرضی دستگاه را همراه با نمونه خاک داخل سیلندر واقع در روی دیسک سرامیکی متخلخل، نشان می‌دهد. علاوه بر اجزاء اصلی دستگاه، جهت انجام آزمایش‌ها و اعمال فشار هوای کنترل شده، یک سیستم تأمین فشار هوا نیز تعبیه گردید.

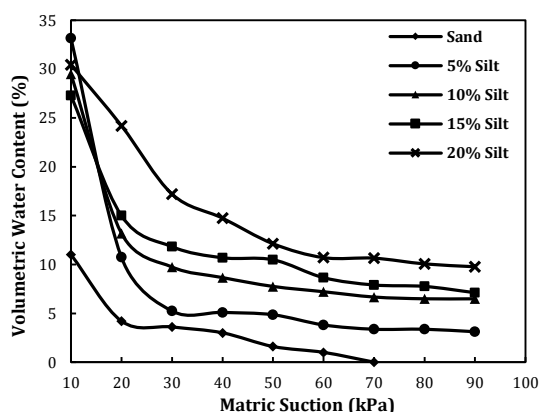
۴- مواد و روش‌ها

۴-۱- خاک‌های مورد استفاده

نمونه خاک ماسه از کارخانه تأمین ماسه ریخته‌گری فیروزکوه تهیه گردید. خاک سیلت ۱ حاصل از نمونه‌برداری از منطقه‌ای در داخل شهر ارومیه و خاک سیلت ۲ از منطقه‌ای واقع در جاده نازلوی ارومیه تهیه گردید. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک‌ها در شکل (۵) قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مورد استفاده

خصوصیات ژئوتکنیکی	ماسه فیروزکوه	سیلت ۱	سیلت ۲
چگالی ویژه	۲/۶۴	۲/۷۶	۲/۵۴
حد روانی (/.)		۳۸/۶	۳۶
حد خمیری (/.)		۲۷/۳	۲۶/۱
ضریب نفوذپذیری (cm/s)	5×10^{-3}	$4/2 \times 10^{-4}$	$6/3 \times 10^{-4}$
نامگذاری در سیستم متحد	SP	ML	ML



شکل ۸- منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک ماسه ترکیب شده با درصد‌های مختلف سیلت ۲

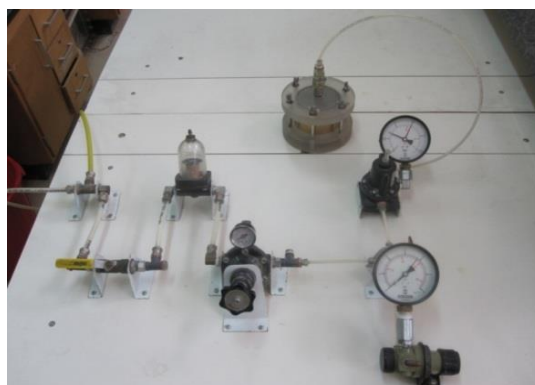
در هر یک از شکل‌های (۷) و (۸)، با افزایش درصد سیلت به خاک ماسه، میزان نگهداشت آب در خاک به ازای مکش مشخص افزایش محسوسی داشته است که حاکی از تأثیر بافت و اندازه ذرات دانه‌هاست. یعنی با ریزتر شدن بافت و اندازه ذرات خاک، پتانسیل مکش افزایش یافته است. در مطالعات بسیاری از محققین، از این پارامتر به عنوان یکی از تأثیرگذارترین عوامل در منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌ها یاد شده است (Vanapalli و همکاران، ۱۹۹۹). در ماسه حاوی سیلت ۱، با افزودن ۱۵٪ سیلت به ماسه (یعنی افزایش از ۰.۵٪ به ۲۰٪)، مقدار درصد رطوبت پسماند از ۴/۲ به ۱۳/۴ درصد و مکش ورودی هوا از ۱۰ به ۱۹ kPa افزایش یافت. بنابراین با افزایش ۱۵ درصدی سیلت، مقادیر ψ_a ، θ_r و θ_r برابر ۱/۹، ۳/۱۸ برابر شد.

۶- برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های منحنی مشخصه آب-خاک

۶-۱- بسته نرم‌افزاری RETC

مدل کامپیوتری RETC، یکی از کارآمدترین مدل‌های تعیین منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک است (Van Genuchten و همکاران، ۱۹۹۱). اساس کار این نرم‌افزار، مدل‌های تجربی بروکز-کوری و وان گنوختن برای تعیین منحنی رطوبتی خاک و مدل‌های معلم و بوردین برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیر اشباع از روی داده‌های منحنی رطوبتی می‌باشد. در فرآیند برازش و برآورد متغیرهای آماری بایستی تا حد امکان مجموع مربعات باقی‌مانده^{۱۶} را کاهش داد زیرا این عبارت نشان‌دهنده میزان خطاهای تصادفی است و هر چه کمیت آن کمتر شود، دقت مدل رگرسیونی افزایش می‌یابد. مجموع مربعات باقی‌مانده به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

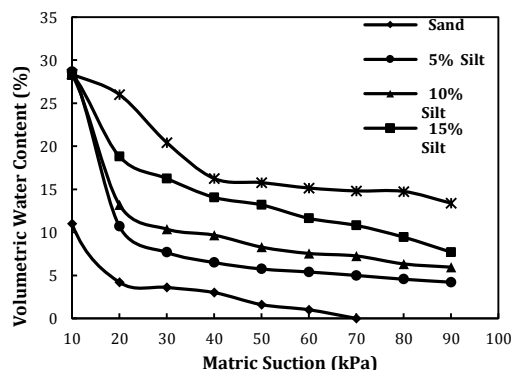
منحنی مشخصه رطوبتی خاک نشان می‌دهد. پس از هر مرحله از اعمال فشار هوا و خروج آب از نمونه خاک و رسیدن به تعادل هیدرولیکی، دستگاه توزین شده و اختلاف مقادیر اوزان به دست آمده، نشان‌دهنده مقدار آب از دست رفته یا اختلاف مقادیر درصد رطوبت خاک می‌باشد که پس از اتمام آزمایش طی یک محاسبات برگشتی به دست می‌آید.



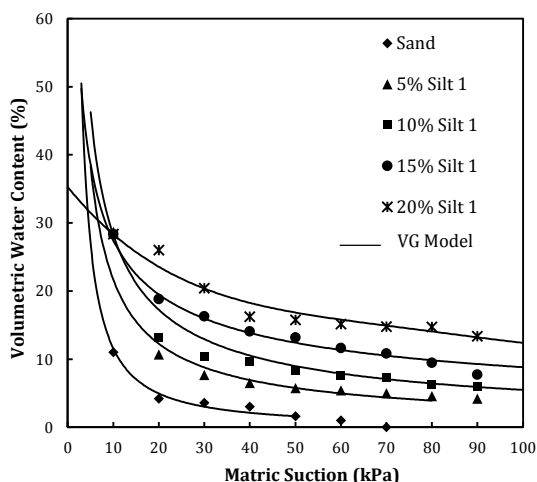
شکل ۶- تصویر محفظه فشار قابل توزین و پانل کنترل فشار در حین انجام آزمایش تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک

۵- نتایج منحنی مشخصه‌های رطوبتی نمونه خاک‌ها

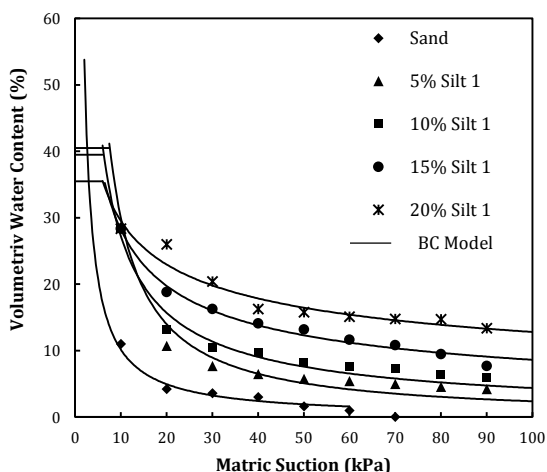
نمونه‌های خاک ماسه فیروزکوه با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ از دو نوع خاک سیلتی ۱ و ۲ ترکیب شده و آزمایش‌های مکش تا فشار ۹۰ kPa بر روی آنها انجام پذیرفت و درصد رطوبت وزنی نمونه‌ها در آخرین مرحله تعیین شدند. پس از انجام محاسبات برگشتی، درصد‌های رطوبت حجمی نمونه‌ها به ازای هر مکش مشخص، تعیین گردید. شکل‌های (۷) و (۸)، منحنی مشخصه‌های رطوبتی ترکیبات ماسه با درصد‌های مختلف خاک‌های سیلت ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.



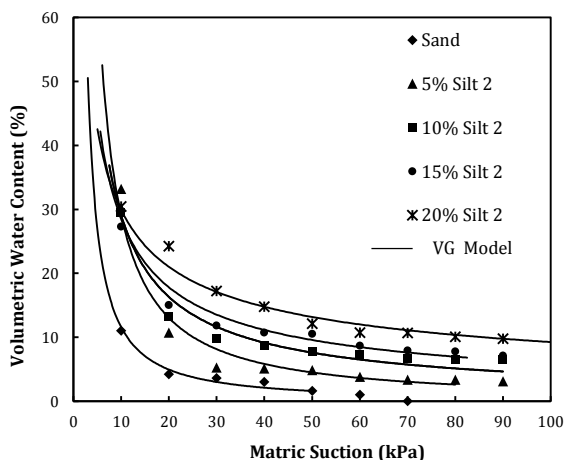
شکل ۷- منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک ماسه ترکیب شده با درصد‌های مختلف سیلت ۱



شکل ۹- برازش نتایج آزمایشگاهی ترکیب ماسه با درصد‌های مختلف سیلت ۱ با مدل وان گنوختن



شکل ۱۰- برازش نتایج آزمایشگاهی ترکیب ماسه با درصد‌های مختلف سیلت ۱ با مدل بروکز- کوری



شکل ۱۱- برازش نتایج آزمایشگاهی ترکیب ماسه با درصد‌های مختلف سیلت ۲ با مدل وان گنوختن

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\theta_{wi} - \theta_{ci})^2 \quad (7)$$

در این رابطه، w_i فاکتور وزنی، θ_{wi} درصد رطوبت حجمی اندازه-گیری شده در مکش مشخص و θ_{ci} درصد رطوبت حجمی محاسبه شده توسط هر مدل در مکش یکسان است. فاکتور وزنی برابر یک در نظر گرفته شد چون تمامی داده‌ها از نظر اهمیت برابر هستند. بهترین برازش هر مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده، آن مدلی است که کمترین مقدار SSR را به دست دهد.

۲-۶- نتایج تحلیل منحنی مشخصه‌های رطوبتی توسط

نرم‌افزار RETC

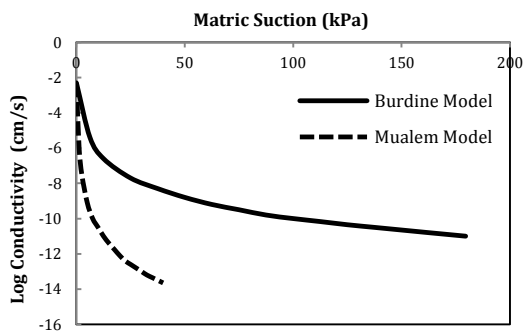
مقادیر SSR و پارامترهای به دست آمده از مدل‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. در تمامی موارد، مقادیر SSR هر دو مدل به حد مطلوبی کم است و برازش قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

شکل‌های (۹) تا (۱۲)، برازش منحنی مشخصه‌های رطوبتی ترکیب خاک ماسه فیروزکوه با درصد‌های مختلف سیلت ۱ و ۲ را با منحنی‌های حاصل از مدل‌های بروکز- کوری و وان گنوختن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، انطباق خوب و قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نظری برقرار می‌باشد.

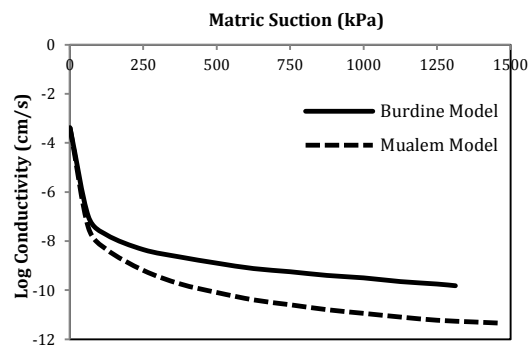
جدول ۲- مقادیر SSR خاک‌های ماسه ترکیب شده با سیلت ۱ و

۲ در تحلیل مدل‌های بروکز- کوری و وان گنوختن

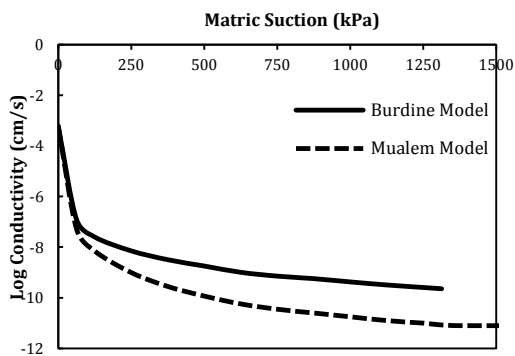
خاک	مدل	درصد وزنی سیلت افزوده شده به خاک ماسه	۲۰	۱۵	۱۰	۵
ماسه حاوی سیلت ۱	BC		۰/۰۰۱۴۷	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۱۴۱	۰/۰۰۱۷۱
	VG		۰/۰۰۱۴۷	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۱۴۴	۰/۰۰۱۷۲
ماسه حاوی سیلت ۲	BC		۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۰۵۲	۰/۰۰۱۹۲	۰/۰۰۱۶۱
	VG		۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۳۵۸	۰/۰۰۱۶۲



شکل ۱۳- منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک ماسه فیروزکوه در مکش‌های مختلف طبق رابطه وان گنوختن

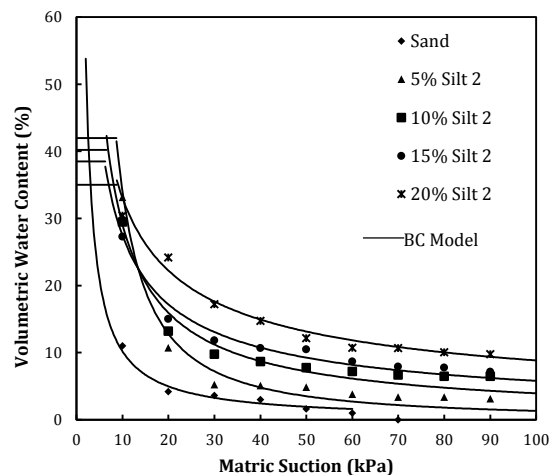


شکل ۱۴- منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک سیلت ۱ در مکش‌های مختلف طبق رابطه وان گنوختن



شکل ۱۵- منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک سیلت ۲ در مکش‌های مختلف طبق رابطه وان گنوختن

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، هر دو مدل بوردین و معلم تا مکش حدود 63 kPa تقریباً بر هم منطبق‌اند اما بعد از این مقدار، اختلاف بین ضرایب نفوذپذیری به ازای مکش‌های یکسان، محسوس است اما شدت کاهش تقریباً برابر است. در این محدوده برای هر دو خاک سیلتي، ضرایب نفوذپذیری پیش‌بینی شده مدل معلم کمتر از مدل بوردین می‌باشد. به عنوان مثال، ضریب نفوذپذیری سیلت ۱ به ازای مکش 1250 kPa طبق مدل‌های بوردین و معلم به ترتیب حدوداً برابر 10^{-11} cm/s و 10^{-11} cm/s به دست آمده است. در تمامی مکش‌ها، ضریب نفوذپذیری



شکل ۱۲- برازش نتایج آزمایشگاهی ترکیب ماسه با درصد‌های مختلف سیلت ۲ با مدل بروکز-کوری

۳-۶- نتایج تحلیل منحنی‌های نفوذپذیری توسط نرم‌افزار RETC

برای پی بردن به مقادیر نفوذپذیری غیر اشباع، محدوده و تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقادیر مکش مختلف، تحلیلی توسط نرم‌افزار RETC با توجه به پارامترهای برازش شده برای خاک‌های ماسه‌ای و سیلتي مورد استفاده در این تحقیق انجام گردید. شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) تغییرات ضرایب نفوذپذیری خاک‌های ماسه فیروزکوه، سیلت ۱ و سیلت ۲ را در مقابل مکش با استفاده از مدل‌های بوردین و معلم و رابطه وان گنوختن، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات مقادیر نفوذپذیری در مکش‌های مختلف زیاد بوده و با افزایش مکش، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال ضریب نفوذپذیری سیلت ۲ در حالت اشباع برابر $6/3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ بوده و در مکش 10 kPa مطابق مدل معلم، به 10^{-8} cm/s کاهش می‌یابد. این شدت کاهش به این دلیل است که، هر چه خاک غیر اشباع‌تر بشود، در ابتدا هوا جایگزین مقداری آب در حفرات بزرگ شده و باعث می‌شود آب از میان حفرات کوچک‌تر و در مسیری با پیچ و خم بیشتری جریان یابد. افزایش مکش در خاک منجر به کاهش بیشتر در حجم حفرات اشغال شده توسط آب شده و مرز بین آب و هوا (جلد انقباضی) به دانه‌های خاک نزدیک‌تر می‌شود. این پدیده، مقاومت بیشتری را در برابر جریان آب به وجود آورده و هدایت هیدرولیکی فاز آب به شدت کاهش می‌یابد (Gallagea و همکاران، ۲۰۱۳).

اختلاف ضرایب نفوذپذیری و نرخ کاهش مقادیر و نیز محدوده مقادیر مکش میان دو مدل بوردین و معلم در خاک ماسه بیشتر است. ولی به دلیل بافت دانه‌ای ماسه و منحنی مشخصه رطوبتی آزمایشگاهی و نظری به دست آمده، پیش‌بینی مدل معلم به واقعیت نزدیک‌تر است.

نوع و بافت خاک در خواص هیدرولیکی غیر اشباع است. در نتیجه، وجود کمی خاک ریزدانه سیلت در خاک دانه‌ای ماسه، می‌تواند به شدت روی خصوصیات رطوبتی خاک‌های ماسه-سیلتی در حالت غیر اشباع اثر بگذارد.

۸- مراجع

- Abdul A, Nishigaki M, Chegbeleh L, Akudago J, Komatsud M, "Determination of Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Sandy Soils Using Membrane Filter with Stainless Wire Mesh", Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University, 2009, 14(1), 13-16.
- Assouline S, "Modelling the relationship between soil bulk density and the water retention curve", Vadose Zone Journal, 2006, 5(2), 554-562.
- Barbour SL, "the soil-water characteristic curve: a historical perspective", Nineteenth Canadian geotechnical colloquium, Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(5), 873-894.
- Brooks RH, Corey AT, "Hydraulic properties of porous medium", Hydrology Paper, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1964, 3.
- Burdine NT, "Relative permeability calculations from pore size distribution data", Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3), 71-78.
- Fredlund DG, Rahardjo H, "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley and Sons, USA, 1993.
- Fredlund DG, Xing A, Fredlund MD, Barbour SL, "Relationship of the shear strength of unsaturated soil to the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3), 440-448.
- Gallagea CH, Kodikarab J, Uchimurac T, "Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two Unsaturated sandy soils during drying and wetting processes", Soils and Foundations, 2013, 53(3), 417-430.
- Goh SG, Rahardjo H, Leong EC, "Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils", Soils and Foundations, 2015, 55(1), 63-73.
- Heshmati AA, Motahari MR, "Modeling the Dependency of Suction Stress Characteristic Curve on Void Ratio in Unsaturated Soils", KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(1), 91-97.
- Miller CJ, Yesiller N, Yaldo K, Merayyan S, "Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(9), 733-742.
- Mualem Y, "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", Water Resources Research, 1976, 12(3), 513-522.
- Nam S, Gutierrez M, Diplas p, Petrie J, Wayllace A, Lu N, Muñoz JJ, "Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils", Engineering Geology, 2009, 110, 1-10.

سیلت ۱ کمتر از سیلت ۲ می‌باشد که ناشی از بافت ریزتر خاک سیلت ۱ است.

۷- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای پی بردن به خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های دانه‌ای در ترکیب با خاک ریزدانه غیر اشباع و برآورد خصوصیات هیدرولیکی این خاک‌ها، ارتباط بین مکش و درصد رطوبت خاک‌های ماسه سیلتی بررسی گردید. بدین منظور دستگاه محفظه فشاری قابل توزین برای به دست آوردن منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌ها، طراحی و ساخته شد. برای آگاهی از اثر خاک ریزدانه سیلت بر رفتار رطوبتی و نفوذپذیری نیمه-اشباع ماسه فیروزکوه، دو نوع سیلت با دانه‌بندی و نشانه خمیری متفاوت انتخاب شد. با توجه به ظرفیت مکش قابل تحمل دستگاه و بافت خاک، ماسه فیروزکوه با سیلت در چهار درصد وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ترکیب شده و منحنی مشخصه‌های رطوبتی آنها به دست آمد. برای صحت‌سنجی و برازش داده‌ها با مدل‌های منحنی مشخصه آب-خاک، داده‌های آزمایشگاهی با نتایج نرم-افزار RETC در مدل‌های شناخته شده وان گنوختن و بروکز-کوری، مقایسه گردید. نتایج به دست آمده انطباق خوبی را بین منحنی‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نظری نشان داد.

نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر

خلاصه نمود:

- ۱- با تحلیل و بررسی منحنی مشخصه‌های رطوبتی نمونه‌های ماسه-سیلتی، مشخص گردید که با افزایش درصد سیلت به خاک ماسه، میزان نگهداشت آب در خاک به ازای مکش مشخص افزایش محسوسی می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر بافت و اندازه ذرات دانه‌ها است. با افزایش ۱۵ درصدی هر دو خاک سیلت ۱ و ۲، از ۵ به ۲۰ درصد، مقدار درصد رطوبت حجمی به ازای مکش ۹۰ kPa افزایش حدود ۶۸ درصدی نشان داد.
- ۲- با توجه به ریزدانه‌تر بودن خاک سیلت ۱ نسبت به سیلت ۲، اثر افزایش پتانسیل نگهداشت آب در خاک ماسه در ترکیب با سیلت ۱ بیشتر است. در ترکیب ۸۰ درصد خاک ماسه با ۲۰ درصد سیلت، مقادیر درصدهای رطوبت حجمی سیلت ۱ نسبت به سیلت ۲ در مکش‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ kPa به ترتیب به میزان ۱۸/۶، ۴۱/۳ و ۳۶/۷ درصد، افزایش نشان می‌دهد.
- ۳- طبق تحلیل نرم‌افزار RETC، تغییرات مقادیر نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی در مکش‌های مختلف زیاد بوده و با افزایش مکش، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد. کمترین مقادیر نفوذپذیری طبق مدل معلم برای خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی غیر اشباع به ترتیب به ازای مکش‌های حدود ۴۰ kPa و ۱۴۶۰ kPa حاصل می‌شود که حاکی از تأثیر زیاد

- Shwetha P, Varijia K, "Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils", *Aquatic Procedia*, 2015, 4, 1142-1149.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE, "Relationship between Soil-water characteristic curves and the as-compacted water content versus soil suction for a clay till", 11th Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999.
- Van Genuchten MT, "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil science society of America journal*, 1980, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten M, Leij F, Yates S, "The RETC code quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils", Office of Research and Development Report No. EPA/600/2-91/065, Washington, DC, EPA, US, 1991.
- Wheeler SJ, "Inclusion of specific water volume within an elastoplastic model for unsaturated soil", *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1), 42-57.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Silt on Soil-Water Characteristics of Unsaturated Sand

Hadi Aliashrafi, Kazem Badv *

Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 22 September 2016; Accepted: 21 September 2017

Keywords:

Sand, Silt, Tempe pressure cell, Matric suction, Water content, Unsaturated permeability.

1. Introduction

The structure of the earth, atmospheric conditions, and hydrogeology, has led that groundwater levels in most parts of the world, including Iran, to decline significantly. This issue causes the large amount of soils above the ground water level to be in unsaturated state. Various activities associated with soils, such as subsurface explorations, foundation engineering and building constructions in unsaturated soils, etc., necessitates the study of the properties of unsaturated soils. One of the most important and fundamental properties of unsaturated soils is water holding capacity or soil suction. The soil-water characteristic curve (SWCC) has been found to be a conceptual and interpretative tool by which the behavior of unsaturated soils can be understood (Vanapali et al., 1999). The SWCC defines the relationship between soil matric suction (the difference between the air and water pressure in the soil) and the volumetric water content.

In this study, the SWCCs of Firoozkoh sand mixed with two silty soils will be investigated to find out the effect of silt on soil-water characteristics of sand in unsaturated state. By conducting this research, one can predict the behavior of natural silty sand for geotechnical applications in practice. In the context of this study, in order to obtain laboratory SWCCs, Tempe pressure cell device will be designed and built.

2. Methodology

2.1. Soil water characteristic curve models

Due to difficulties of laboratory measurements and time consuming of tests, several models for estimating SWCCs have been proposed. The Brooks-Corey (1964) model is

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} \quad (1)$$

Where θ is the volumetric water content due to suction (h). θ_r is residual water content, θ_s is saturated water content and α is reverse of air entry suction. λ is the pore-size distribution index and is related to the slope of the curve. The van Genuchten (1980) model is

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} \quad (2)$$

Where the parameter n controls the slope of the SWCC about the pivot point and the parameter m rotates the sloping portion of the curve.

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.aliashrafi@urmia.ac.ir (Hadi Aliashrafi), k.badv@urmia.ac.ir (Kazem Badv).

2.2. Design of Tempe Pressure Cell Apparatus

In this study, the Tempe pressure cell apparatus was designed. This apparatus consists of three parts. The top and base caps made of Plexiglas, a brass cylinder that contains the soil sample, and a porous ceramic plate with a certain air entry value placed under the soil. The Tempe pressure cell provides a simple method to determine SWCC. This characteristic of soils is determined by weighting the complete cell at pressure equilibrium points. Fig. 1. shows a schematic cross-sectional view of the Tempe pressure cell and its components.

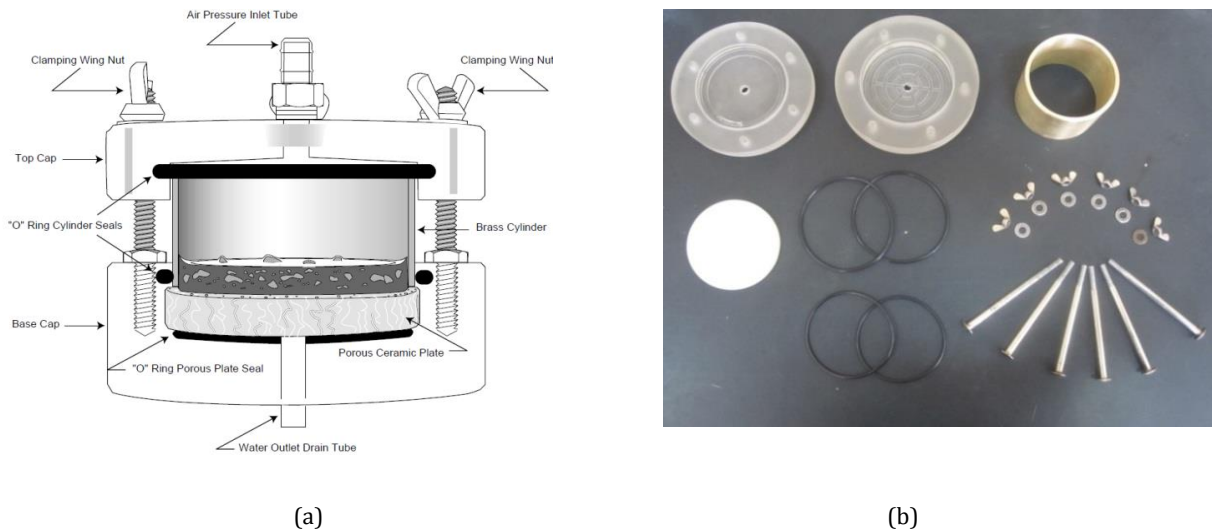


Fig. 1. Tempe Pressure cell apparatus: (a) Cross sectional view, (b) prepared components

2.3. Materials

The sand used in this study was obtained from Tamin Mase Rikhteghari Company in Firoozkoh, Iran. The silt 1 and 2 used was obtained from different regions in Urmia City. Properties of soils are given in Table 1.

Table 1. Properties of soils

Properties	Sand	Silt1	Silt2
Specific Gravity, Gs	2.64	2.76	2.54
Liquid Limit, LL(%)	-	38.6	36
Plastic Limit, PL(%)	-	27.3	26.1
Unified Soil Classification	SP	ML	ML

2.4. Testing Procedure

Prior to making a run, the ceramic disk was saturated by soaking in distilled water for 24 hours. After compaction of soil sample in the cylinder, Tempe pressure cell components including wire mesh, filter paper, aluminum porous plate, and spring, were placed on the sample and the upper cap was attached to the cylinder. Air pressure was applied to the distilled de-aired water tank which caused the water flow from bottom to the top of the sample. At the end of saturation process, the accumulated water above the sample was drained. The suction on sample was applied in increments of 10kPa air pressure and water exiting from the compartment below the ceramic disk was monitored. At the end of the test, the cell was dis-assembled and the final water content of the sample was measured. The water content at each suction level was back-calculated based on the final water content and the amount of water losses recorded at each suction level.

3. Results and discussion

3.1. Laboratory SWCCs

Fig. 2. shows SWCCs of samples of Firoozkoh sand mixed with silt1 and silt2. Results illustrated that as silt content increased, holding capacity of water in samples increased; this is due to the influence of several factors such as texture, mineralogy, and type of soil. Vanapalli et al., (1999) represented these factors that influence the SWCCs. In silt 1 with increasing 15% silt to sand from 5% to 20%, residual water content of sample increased from 4.2% to 13.4% and also air entry suction increased from 10 kPa to 19 kPa.

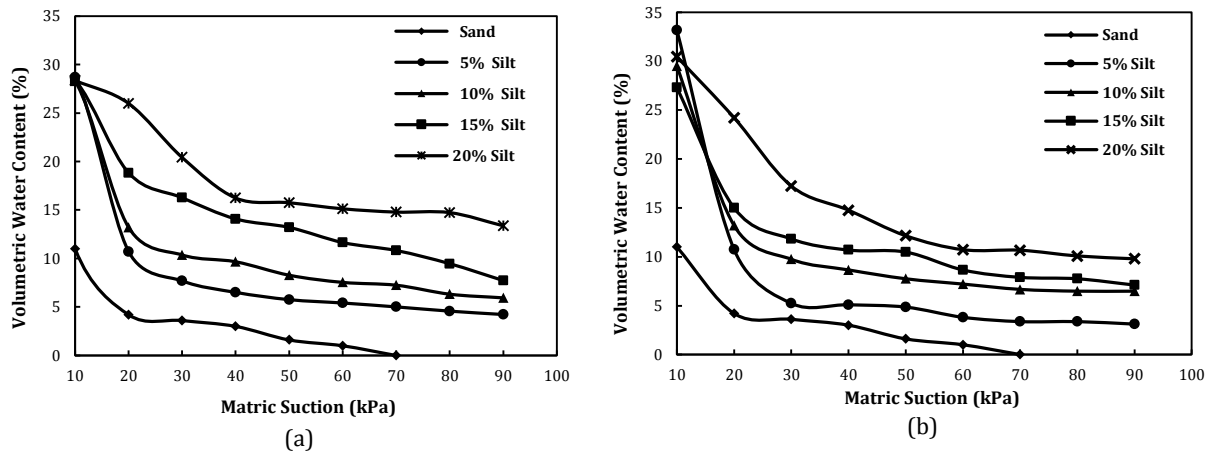


Fig. 2. Laboratory SWCCs of Firoozkoh sand mixed with: (a) silt 1, (b) silt 2

3.2. Fitting of laboratory SWCCs and theoretical models

Laboratory data obtained in the tests were fit to the models described by Van Genuchten (1980) and Brooks-corey (1964) equations in RETC computer code. According to values of SSR, each of models provide an acceptable fit to the experimental data.

3.3. Unsaturated hydraulic conductivities of BES samples

For understanding hydraulic conductivities of samples in different soil suction and range of changes, laboratory data contains SWCCs obtained from Tempe pressure cell apparatus were analyzed with Mualem (1976) and Burdine (1953) models in RETC computer code. Results illustrated that changes of hydraulic conductivities were large and with increasing of suction, hydraulic conductivity decreasing; for example saturated hydraulic conductivity of Silt1 is 4.2×10^{-4} cm/s whereas hydraulic conductivity in 1250 kPa according to Mualem model is equal to 1×10^{-11} cm/s.

4. Conclusions

Results of SWCCs illustrated that as silt content increased, holding capacity of water in samples increased. For example, with increasing 15% of silt 1 and 2 from 5% to 20%, the increase of volumetric water content in 90 kPa is 68%. The effect of silt 1 in increasing water holding capacity of sand was more than silt 2, because the particle size of silt1 was finer. Analysis of laboratory data contains SWCCs and hydraulic conductivities with Mualem (1976) and Burdine (1953) models in RETC computer code illustrated that changes of hydraulic conductivities were large and with increasing of suction, hydraulic conductivity decreasing. According to Mualem model, the minimum unsaturated hydraulic conductivity of sand was obtained in 40 kPa whereas this value for silt 1 and 2 was 1460 kPa, therefore the effect of silt on hydraulic characteristics of sand was severe and should be considered in geotechnical issues.

5. References

- Brooks RH, Corey AT, "Hydraulic properties of porous medium", Hydrology Paper, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1964, 3.
- Burdine, NT, "Relative permeability calculations from pore size distribution data", Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3), 71-78.
- Mualem Y, "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", Water Resources Research, 1976, 12(3), 513-522.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE, "Relationship between Soil-water characteristic curves and the as-compacted water content versus soil suction for a clay till", 11th Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999.
- Van Genuchten MT, "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil science society of America journal, 1980, 44(5), 892-898.