

# تأثیر نوع خاک در خصوصیات رطوبتی و هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع

Research Note

هادی علی اشرفی (دانشجوی دکتری)

کاظم بدو\* (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه

یکی از موضوعات مهم برای پیش‌بینی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های غیراشباع، منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی و تعیین ضرایب نفوذپذیری غیراشباع آن‌هاست. در پژوهش حاضر، به‌منظور تحلیل تأثیر نوع خاک در خصوصیات رطوبتی و هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع، اعم از خاک‌های ماسه‌یی، سیلتی و رسی موجود در طبیعت، سه نوع خاک با اندازه‌ی ذرات مختلف از منطقه‌ی نازلوی شهرستان ارومیه نمونه‌برداری شدند. برای دستیابی به منحنی‌های مشخصه‌ی آزمایشگاهی خاک‌های غیراشباع، یک دستگاه صفحه‌ی فشاری به همراه سیستم کنترل فشار، طراحی و ساخته شد. نتایج آزمایشگاهی، با دو مدل وان گنوختن و بروکز - کوری در نرم‌افزار RETC صحت‌سنجی شدند. با تحلیل نتایج منحنی‌های مشخصه، مشخص شد که با ریزتر شدن ذرات خاک، میزان نگره‌داشت آب در خاک به ازاء مکش مشخص افزایش محسوسی دارد و مقادیر بیشتری از مکش ورودی هوا، درصد رطوبت پسماند و درصد رطوبت اشباع را به دست می‌دهند که حاکی از تأثیر بافت و اندازه‌ی ذرات دانه‌هاست.

واژگان کلیدی: نوع خاک، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی، نفوذپذیری غیراشباع، دستگاه صفحه‌ی فشاری.

h.aliashrafi@urmia.ac.ir  
k.badv@urmia.ac.ir

## ۱. مقدمه

کرد. [۲] منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، مقدار مکش موجود در خاک را به درصد رطوبت خاک مرتبط می‌سازد. [۳] مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که بین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک و ویژگی‌های خاک غیراشباع ارتباط وجود دارد. [۴] منحنی مشخصه‌ی رطوبتی، یکی از اساسی‌ترین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های غیراشباع است که برای تخمین مقاومت برشی، روابط تنش - کرنش و نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع استفاده می‌شود. [۵-۱۲] با استفاده از اطلاعات موجود در منحنی مشخصه‌ی رطوبتی، از قبیل: فرم منحنی، شیب منحنی، خطوط مماس بر منحنی و غیره، می‌توان بخشی از رفتار ژئوتکنیکی خاک غیراشباع را پیش‌بینی کرد. عوامل در خصوصیات آب - خاک تأثیر می‌گذارند. این عوامل عبارت‌اند از: ساختار خاک، پیوستگی خاک، درصد رطوبت اولیه‌ی تراکمی، نسبت تخلخل، نوع خاک، بافت خاک، کانی‌های خاک، تاریخچه‌ی تنش، روش تراکم و غیره. [۱]

در پژوهش حاضر، برای بررسی تأثیر نوع خاک‌ها در مقدار مکش و ظرفیت نگره‌داشت آب روی خاک‌ها، منحنی مشخصه‌های رطوبتی آزمایشگاهی خاک‌های منطقه‌ی نازلو در حومه‌ی شهرستان ارومیه، با نشانه‌ی خمیری و اندازه‌ی دانه‌های متفاوت به‌دست آمده است. با تحلیل و بررسی منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی نمونه‌های مورد آزمایش، می‌توان رفتار واقعی خاک‌های ماسه‌یی، سیلتی و رسی

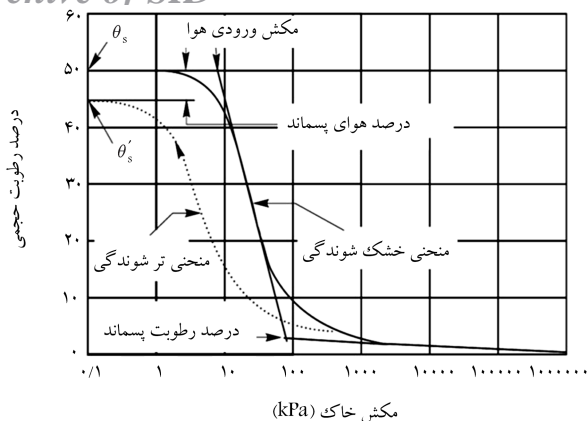
ساختار کروی زمین، شرایط جوی و هیدروژئولوژی باعث شده است که سطح آب زیرزمینی در اغلب نقاط جهان و از جمله کشور ایران، در اعماق قابل توجهی از سطح زمین قرار گیرد. این موضوع سبب می‌شود که حجم زیادی از خاک‌ها در ناحیه‌ی بالای سطح آب زیرزمینی و در حالت غیراشباع قرار گیرند. با توجه به اینکه عملیات مرتبط با خاک در شاخه‌های مختلف، از قبیل: شناسایی‌های زیرسطحی، مهندسی پی و مسائل ژئوتکنیکی در ناحیه‌ی غیراشباع خاک‌ها انجام می‌پذیرد، مطالعه و پژوهش روی خصوصیات رطوبتی و هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع، امری ضروری و بدیهی است.

یکی از اصلی‌ترین موضوعات تأثیرگذار در بحث خاک‌های غیراشباع، مقدار مکش یا ظرفیت نگره‌داشت آب در خاک است. مکش به علت وجود هوا در خاک ایجاد می‌شود و با درصد رطوبت خاک، رابطه‌ی عکس دارد. مکش با غیراشباع‌تر شدن خاک افزایش می‌یابد و در اغلب پارامترها و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک اثرگذار است. [۱] منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک (SWCC) [۱] ابزاری تفسیری و ادراکی است که با استفاده از آن می‌توان رفتار خاک‌های غیراشباع را تحلیل

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۱/۱۵، پذیرش ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

DOI:10.24200/J30.2018.5022.2193



شکل ۲. منحنی مشخصه‌ی رطوبتی تیپ خاک‌ها. [۱۶]

مرتبط با اندازه‌گیری منحنی ترشوندگی، آزمایشی که فقط منحنی خشک‌شوندگی را نتیجه دهد، آزمایش استاندارد محسوب می‌شود. [۱۵، ۱۴] پارامترهای مهم و کاربردی در منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، عبارت‌اند از: مکش ورودی هوا ( $\Psi_a$ )، درصد رطوبت پسماند  $\theta_r$  و درصد رطوبت در بیشترین درجه‌ی اشباع  $\theta_s$ . مقدار ورودی هوا (فشار حبابی)  $\theta_s$ ، مکش کالبدی است که به ازاء آن، هوا وارد بزرگ‌ترین حفره‌های خاک می‌شود و درصد رطوبت پسماند رطوبتی است که برای خروج آن از خاک، تغییر مکش زیادی لازم است. [۱۶] منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک‌ها با اندازه‌ی ذرات بزرگ‌تر، شامل ماسه‌ها و سیلت‌ها، به سمت چپ انتقال می‌یابد و در واقع، مقادیر کمتری از مکش ورودی هوا، درصد رطوبت پسماند و درصد رطوبت در بیشترین درجه‌ی اشباع را نتیجه می‌دهند. [۱] به‌طور کلی با ریزتر شدن ذرات خاک، ظرفیت تحمل نگه‌داشت آب در خاک به ازاء مکش مشخص افزایش می‌یابد.

### ۳.۲. مدل‌های منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک

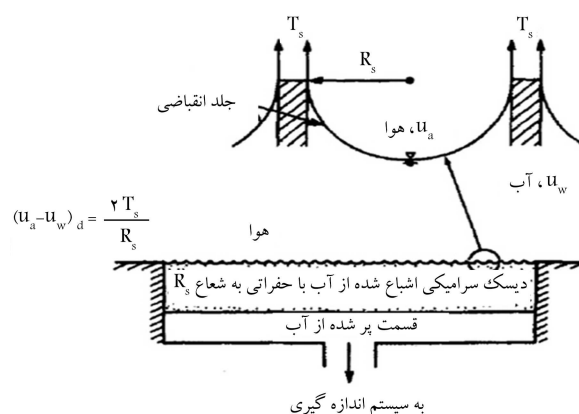
با توجه به دشواری اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، صرف وقت و هزینه‌ی زیاد، مدل‌هایی برای پیش‌بینی میزان رطوبت از روی پتانسیل مکش توسط پژوهشگران متعددی ارائه شده است. مدل‌های بروکز - کوری  $\lambda$  و وان گنوختن  $\lambda$  روش‌های رایج‌تری برای به‌دست آوردن منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک هستند. [۵] بروکز و کوری، یک معادله‌ی نمایی طبق رابطه‌ی ۲ را برای نگه‌داشت رطوبتی خاک پیشنهاد کرده‌اند: [۱۷]

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (\alpha h)^{-\lambda} \quad (2)$$

که در آن،  $Se$  درجه‌ی اشباع،  $\theta$  درصد رطوبت در مکش  $h$ ،  $\theta_r$  درصد رطوبت پسماند،  $\theta_s$  درصد رطوبت اشباع و  $\alpha$  عکس مکش ورود هوا نامیده می‌شود.  $\lambda$  ضریبی است که از طریق برازش داده‌های مکش و درصد رطوبت حجمی به‌دست می‌آید. وان گنوختن برای توصیف منحنی رطوبت خاک در کل محدوده‌ی مکش، معادله‌ی ۳ را پیشنهاد کرده است: [۱۸]

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3)$$

که در آن،  $m$  و  $n$  ضرایب تجربی هستند و سایر متغیرها در رابطه‌ی اخیر توضیح داده شده‌اند.



شکل ۱. عملکرد دیسک‌های با فشار توصیف شده‌ی هوای ورودی بالا توسط مدل مویینگی کلونین [۱۳]

غیراشباع موجود در طبیعت و یا استفاده شده در پروژه‌های عمرانی را با توجه به محدوده‌ی اندازه‌ی دانه‌ها و خصوصیات خمیری آن‌ها، دقیق‌تر تحلیل کرد. بدین منظور در راستای انجام مطالعه‌ی حاضر، دستگاه صفحه‌ی فشاری  $\lambda$  برای به‌دست آوردن منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی آزمایشگاهی خاک، طراحی و ساخته شد.

## ۲. مکش در خاک‌های غیراشباع

### ۱.۲. دیسک‌های با فشار هوای ورودی بالا

دیسک همانند یک غشا بین آب و هوا عمل می‌کند. دیسک معمولاً از جنس سرامیک بوده و از خاکستر کائولین  $\lambda$  ساخته شده است. به محض اینکه دیسک برای یک بار با آب اشباع شد، هوا نمی‌تواند از دیسک عبور کند، آن هم به دلیل توانایی جلد انقباضی  $\lambda$  است که در برابر جریان هوا مقاومت می‌کند. [۱۳] توانایی دیسک سرامیکی برای مقابله در برابر جریان هوا، در نتیجه‌ی کشش سطحی روی جلد انقباضی است. مطابق شکل ۱، جلد انقباضی مانند غشاء نازکی عمل می‌کند که حفره‌های کوچکی با شعاع انحنا را در روی سطح دیسک سرامیکی به همدیگر متصل کند. اختلاف بین فشار هوای بالای جلد انقباضی و فشار آب در زیر جلد انقباضی، مبین مکش کالبدی است. بیشینه‌ی مکش کالبدی، که می‌تواند در سطح دیسک سرامیکی ایجاد شود، فشار ورودی هوا  $\lambda$  نام دارد.

فشار ورودی هوای دیسک با استفاده از رابطه‌ی کلونین  $\lambda$  نشان داده می‌شود (رابطه‌ی ۱):

$$(u_a - u_w)_d = \frac{\gamma T_s}{R_s} \quad (1)$$

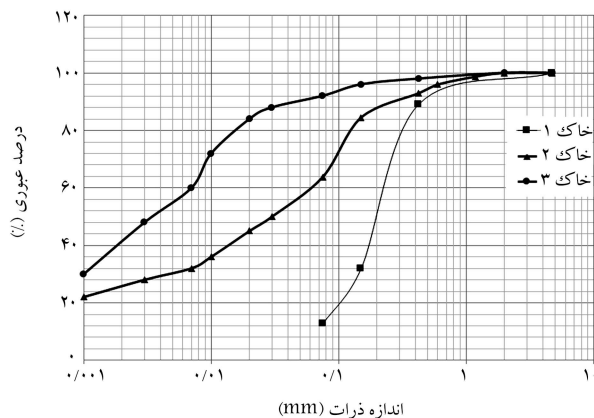
که در آن،  $(u_a - u_w)_d$  مقدار فشار هوای ورودی دیسک با فشار هوای ورودی بالا،  $T_s$  کشش سطحی جلد انقباضی یا فصل مشترک آب - هوا  $\lambda = 72.75 \text{ mN/m}$  و  $T_s = 20^\circ \text{C}$  در دمای  $20^\circ \text{C}$  و  $R_s$  شعاع انحنا‌ی جلد انقباضی یا شعاع بزرگ‌ترین حفره هستند.

### ۲.۲. منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک

شکل ۲، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی تیپ خاک‌ها را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه‌ی رطوبتی حلقه‌یی است متشکل از منحنی‌های مرزی جذب آب  $\lambda$  (منحنی ترشوندگی) و منحنی دفع آب  $\lambda$  (منحنی خشک‌شوندگی). به علت دشواری‌های آزمایشگاهی



شکل ۳. اجزاء و قطعات دستگاه صفحه‌ی فشاری.



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده.

داخل صفحه‌ی محفظه‌ی تحتانی قرار گرفت. در نهایت، ترانس میل‌هایی جهت به هم پیوستن اجزاء دستگاه در نظر گرفته شدند. تمامی اجزاء دستگاه صفحه‌ی فشاری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. علاوه بر اجزاء اصلی دستگاه، جهت انجام آزمایش‌ها و اعمال فشار هوای کنترل‌شده، یک سیستم تأمین فشار هوا نیز تعبیه شد. بعد از طراحی و ساخت تمام قطعات مورد نیاز دستگاه صفحه‌ی فشاری، قبل از انجام آزمایش‌ها، دستگاه مذکور مکرراً با اعمال فشار هوا آزمایش شد و برای اطمینان از عدم نشتی هوا، بارها دستگاه در سطل پر از آب قرار داده شد و حبابی از هیچ‌یک از قسمت‌های دستگاه به بیرون و داخل آب خارج نشد. این موارد قبل از انجام هر آزمایش مجدداً تکرار شدند، تا از صحت عملکرد آن اطمینان حاصل شود. در طول آزمایش‌ها نیز هیچ جریان هوایی مشاهده نشد. فردلانده<sup>۲۰</sup> نیز به این مطلب اشاره داشته است شرایطی که هیچ جریانی در حین اندازه‌گیری مکش کالبدی رخ ندهد، دلیلی بر صحت روش انتقال محوری است.<sup>[۱۳]</sup>

#### ۴. مواد و روش‌ها

##### ۴.۱. خاک‌های مورد استفاده

نمونه‌های خاک از حومه‌ی شهرستان ارومیه واقع در جاده‌ی نازلو تهیه شدند. خاک ۱، از کیلومتر ۱۵ جاده و اطراف محوطه‌ی مدفن زباله‌ی شهر ارومیه؛ خاک ۲، از کیلومتر ۶ جاده و اطراف کارخانه‌ی آجرپزی خامنه؛ و خاک ۳، از کیلومتر ۲ جاده و اطراف کارخانه‌ی آجرپزی آذرسفال تهیه شدند. خصوصیات خاک‌های استفاده شده در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی خاک‌ها در شکل ۴ ملاحظه می‌شوند.

#### ۴.۲. روابط تجربی محاسبه‌ی هدایت هیدرولیکی غیراشباع

کاربردی‌ترین خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع هستند.<sup>[۱۹]</sup> بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی مرتبط با خاک‌های غیراشباع، از قبیل: پایداری شیب‌ها، سدهای خاکی لایه‌های مترکم رسی، انتقال آلاینده‌ها، و موارد دیگر، نیازمند دانستن نفوذپذیری غیراشباع خاک‌هاست.<sup>[۲۰]</sup>

تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع با روش‌های آزمایشگاهی یا صحرایی وقت‌گیر و پرهزینه است. پژوهشگران، روش‌های تئوریک را بر مبنای توزیع اندازه‌ی ذرات، به منظور پیش‌بینی ضریب نفوذپذیری ابداع کرده‌اند. پیش‌بینی‌های انجام شده، اغلب به روش غیرمستقیم برای تعیین نفوذپذیری مرتبط می‌شود.<sup>[۱۳]</sup> استفاده از ضریب نفوذپذیری اشباع و منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، روش قابل‌قبولی برای پیش‌بینی تابع نفوذپذیری برای خاک غیراشباع است.<sup>[۲۱، ۲۲]</sup> هدایت هیدرولیکی غیراشباع معمولاً با استفاده از مدل بوردین<sup>۱۴</sup> یا مدل معلم<sup>۱۵</sup> و با داشتن منحنی مشخصه‌ی رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط روابط بروکز-کوری و وان گنوختن به دست می‌آید.<sup>[۲۳، ۲۴، ۱۰]</sup>

با ترکیب تابع بروکز-کوری با مدل بوردین، هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $K(S_e)$  به صورت رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$K(S_e) = K_s(S_e)^{2+2/\lambda} \quad (4)$$

با ترکیب تابع وان گنوختن و در نظر گرفتن مدل توزیع اندازه‌ی ذرات معلم، هدایت هیدرولیکی غیراشباع به صورت رابطه‌ی ۵ نوشته می‌شود:

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} \left[ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (5)$$

در روابط ۴ و ۵،  $K_s$  ضریب نفوذپذیری اشباع بوده و سایر متغیرها قبلاً توضیح داده شده‌اند.

#### ۴.۳. طراحی و ساخت دستگاه صفحه‌ی فشاری

به منظور دست یافتن به منحنی‌های مشخصه‌ی رطوبتی-مکش خاک‌ها در پژوهش حاضر، یک دستگاه صفحه‌ی فشاری طراحی و ساخته شد. دستگاه صفحه‌ی فشاری، بر مبنای روش انتقال محوری<sup>۱۶</sup> کار می‌کند؛ یعنی مستقیماً مکش کالبدی را از طریق افزایش فشار هوا کنترل می‌کند. فشار آب، مقدار منفی بالایی ندارد و این موضوع از حفره‌سازی<sup>۱۷</sup> در آب جلوگیری می‌کند.<sup>[۲۵]</sup> دستگاه صفحه‌ی فشاری معمولاً برای مکش‌های کالبدی تا  $200 \text{ kPa}$  استفاده می‌شود.<sup>[۱۳]</sup>

دستگاه صفحه‌ی فشاری، شامل: سیلندر، محفظه‌ی تحتانی و سرپوش فوقانی همه از جنس استیل ضد آب هستند. سیلندر به قطر داخلی  $11.3 \text{ cm}$ ، ضخامت  $0.6 \text{ cm}$ ، و ارتفاع  $11 \text{ cm}$  تراش داده شد که وظیفه‌ی محبوس کردن هوای اعمالی روی نمونه را دارد. در جداره‌ی سیلندر در بالا و پایین آن نیز، واشرهای لاستیکی به ضخامت  $2.5 \text{ mm}$  تعبیه شدند تا سیلندر با فشاری مناسب به صفحات بالا و پایین چفت شود. صفحه‌ی بالا با متصل‌کننده تعبیه شده روی آن، فشار هوا را به داخل سیلندر هدایت می‌کند. صفحه‌ی پایین که خود متشکل از دو قسمت است، توسط پیچ‌هایی در اطراف با یک حلقه‌ی لاستیکی به همدیگر قفل شدند تا امکان خروج هوا از دستگاه وجود نداشته باشد. صفحه‌ی سرامیکی متخلخل<sup>۱۸</sup> با ظرفیت ۲ بار از شرکت سوئیل موئیستچر<sup>۱۹</sup> از کشور کانادا تهیه شد و کاملاً در

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مورد مطالعه.

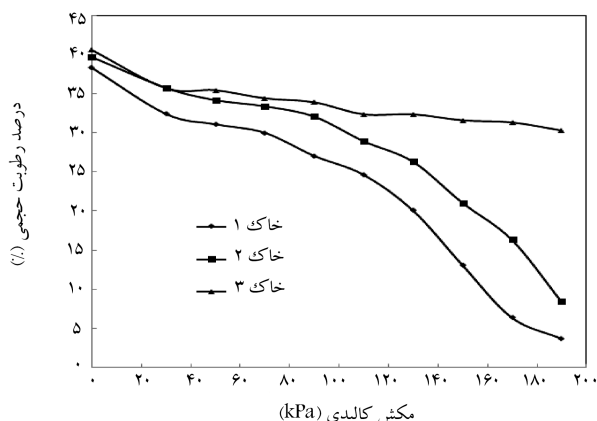
خصوصیات ژئوتکنیکی	خاک		
	۱	۲	۳
چگالی ویژه	۲,۶۵	۲,۶۷	۲,۶۹
حد روانی (%)	۲۳,۵	۲۴,۴	۴۱,۳
حد خمیری (%)	۲۲,۱	۲۱,۷	۲۶,۶
درصد رطوبت بهینه (%)	۱۷	۱۶	۲۱,۶
بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک ( $kN/m^3$ )	۱۸,۳	۱۷,۴	۱۵,۸
ضریب نفوذپذیری ( $m/s$ )	$۲,۲ \times 10^{-5}$	$۳,۴ \times 10^{-6}$	$۱,۶ \times 10^{-9}$
نام در سیستم طبقه‌بندی متحد	SM	ML	CL

آمد و با انجام محاسبات برگشتی، درصد‌های رطوبت نمونه در هر یک از فشارهای اعمالی حاصل شد و درنهایت، با ثبت داده‌های آزمایشگاهی، منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک به دست آمد.

## ۵. نتایج منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌ها

نقاط آزمایشگاهی و منحنی‌های مشخصه‌ی خاک‌ها در محدوده‌ی مکش تا حدود  $۲۰ \text{ kPa}$  در شکل ۶ مشاهده می‌شوند که مطابق آن با ریزتر شدن ذرات خاک، میزان نگاه‌داشت آب در خاک‌ها به ازاء مکش مشخص، افزایش محسوسی داشته است، که حاکی از تأثیر بافت و اندازه‌ی ذرات دانه‌هاست. یعنی با ریزتر شدن بافت و اندازه‌ی ذرات خاک، پتانسیل مکش افزایش یافته است. در مطالعات بسیاری از پژوهشگران، از پارامتر ریزتر شدن ذرات خاک به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین عوامل در منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌ها یاد شده است.<sup>[۱]</sup>

مقادیر درصد رطوبت، با ریزتر شدن ذرات خاک از ماسه‌یی به سیلتی و از سیلت به رس افزایش می‌یابند. پژوهشگران دیگری نیز به این نتیجه دست یافتند که منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک‌ها با اندازه‌ی ذرات بزرگ‌تر، شامل ماسه‌ها و سیلت‌ها، مقادیر کمتری از مکش ورودی هوا، درصد رطوبت پسماند و درصد رطوبت در بیشترین درجه‌ی اشباع را نتیجه می‌دهند.<sup>[۱]</sup> علاوه بر تأثیر ریزدانه‌ها در مکش و منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک، پارامتر نشانه‌ی خمیری نیز حائز اهمیت است. به‌طوری که با افزایش نشانه‌ی خمیری از خاک سیلتی (خاک ۲)



شکل ۶. منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه (منطقه‌ی نازولی شهرستان ارومیه).

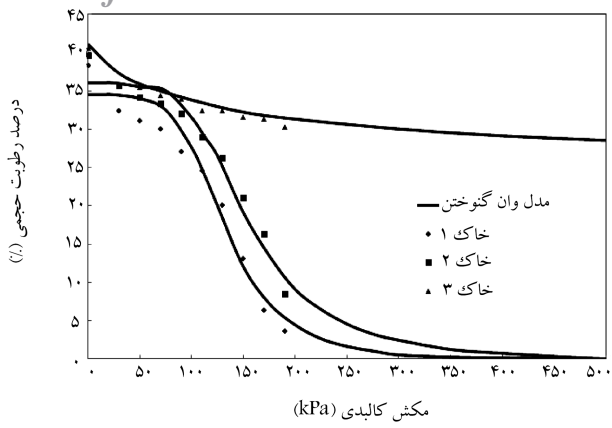
## ۲.۴. آزمایش‌های تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی

در ابتدا خاک‌ها در درصد رطوبت بهینه با توجه به روش A تراکم پروکتور استاندارد متراکم شدند.<sup>[۲۶]</sup> سپس حلقه‌یی به قطر داخلی  $۴,۹۵ \text{ cm}$  و ارتفاع  $۲ \text{ cm}$  با فشاری مناسب وارد قالب تراکم شد و توسط جک هیدرولیکی خارج شد. در ادامه، حلقه و نمونه‌ی خاک متراکم داخل آن و نیز دیسک سرامیکی به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. دیسک سرامیکی اشباع شده در داخل محفظه‌ی پایین تعبیه شد و دو قسمت محفظه‌ی پایین توسط حلقه‌ی لاستیکی و پیچ‌های موجود در اطراف به همدیگر با فشاری مناسب پیوستند. هر یک از نمونه‌های اشباع داخل حلقه‌ی نمونه‌گیر به همراه کاغذ صافی، روی دیسک سرامیکی قرار گرفتند و تماس مستقیم نمونه با دیسک حاصل شد. سیلندر روی محفظه‌ی پایین تعبیه شد و سرپوش بالایی بر روی سیلندر قرار گرفت و تمامی اجزاء دستگاه توسط ۴ عدد ترانس‌میل و مهره‌های آن با فشاری مناسب به همدیگر چفت شدند.

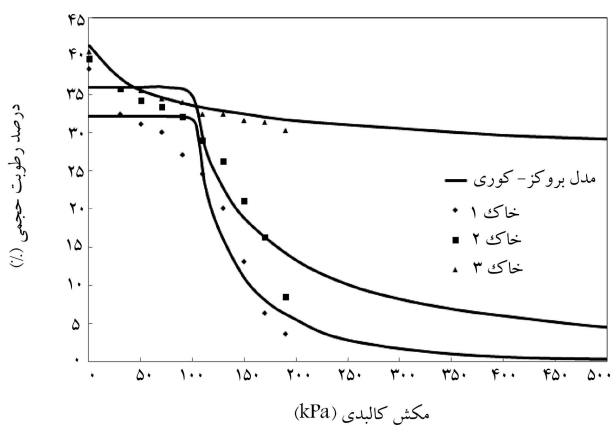
بعد از آماده شدن دستگاه، اولین فشار هوا به میزان  $۳۰ \text{ kPa}$  توسط متصل‌کننده تعبیه شده در سرپوش به داخل سیلندر و نمونه‌ی خاکی وارد شد. با گذشت مدت زمان کافی برای توقف زهکشی آب از نمونه و رسیدن به تعادل هیدرولیکی، نمونه از داخل سیلندر دستگاه خارج و وزن دقیق آن ثبت شد. در ادامه، نمونه روی دیسک سرامیکی قرار گرفت و در هر فشار هوای اعمالی، تمامی مراحل قبلی مجدداً تکرار شدند. شکل ۵، دستگاه محفظه‌ی فشاری قابل توزین را روی پانل کنترل فشار هوا در حین انجام آزمایش تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک نشان می‌دهد. در آخرین گام و فشار اعمالی  $۱,۹۰ \text{ kPa}$ ، درصد رطوبت نهایی نمونه‌ی خاک به دست



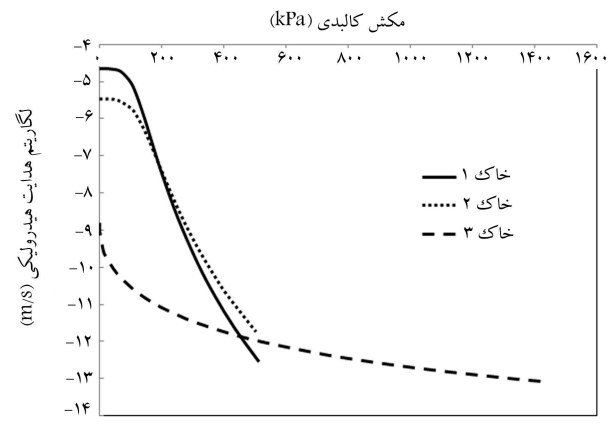
شکل ۵. تصویر دستگاه صفحه‌ی فشاری و پانل کنترل فشار در حین انجام آزمایش تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک.



شکل ۷. برازش نتایج آزمایشگاهی خاک‌های مورد مطالعه با مدل وان گنوختن.



شکل ۸. برازش نتایج آزمایشگاهی خاک‌های مورد مطالعه با مدل بروکز - کوری.



شکل ۹. منحنی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک‌های مورد مطالعه در مکش‌های مختلف با مدل وان گنوختن و معلم.

**۳.۶. نتایج تحلیل منحنی‌های نفوذپذیری توسط نرم‌افزار RETC**

در ادامه، تحلیلی توسط نرم‌افزار RETC با توجه به پارامترهای برازش شده برای خاک‌های ماسه‌بی، سیلتی و رسی مورد استفاده در پژوهش حاضر انجام شد. شکل‌های ۹ و ۱۰، تغییرات ضرایب نفوذپذیری خاک‌های ۱، ۲، و ۳ را در مقابل مکش با استفاده از مدل‌های وان گنوختن و معلم و نیز بروکز - کوری و بوردین نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات مقادیر نفوذپذیری در مکش‌های

به مقدار ۲/۷٪ به خاک رسی (خاک ۳) برابر ۱۴/۷٪، میزان ننگه‌داشت آب در خاک‌ها افزایش محسوسی می‌یابد. به عنوان مثال، در مکش ۱۵۰ kPa، مقدار درصد رطوبت حجمی خاک ۲، برابر ۲۱/۰۵٪ و این مقدار برای خاک ۳ برابر ۳۱/۵۷٪ است؛ یعنی با افزایش ۱۲ درصدی نشانه‌ی خمیری، رطوبت حجمی به میزان ۱۰/۵۲٪ افزایش داشته است. مطالعات سایر پژوهشگران نیز نشان داده است که درصد رطوبت اشباع و مکش ورودی هوا، معمولاً با افزایش حالت خمیری خاک افزایش می‌یابد.<sup>[۱۶]</sup>

**۶. برازش منحنی مشخصه‌های آب - خاک آزمایشگاهی**

**با مدل‌های تئوریک**

**۱.۶. بسته‌ی نرم افزاری RETC**

مدل رایانه‌ی RETC، حاوی مدل‌های تعیین منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک است.<sup>[۲۷]</sup> اساس کار نرم‌افزار RETC، مدل‌های تجربی بروکز - کوری و وان گنوختن برای تعیین منحنی رطوبتی خاک و مدل‌های معلم و بوردین برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع از روی داده‌های منحنی مشخصه‌ی رطوبتی است. در فرایند برازش و برآورد متغیرهای آماری، باید تا حد امکان مجموع مربعات باقیمانده (SSR) را کاهش داد، زیرا عبارت اخیر نشان‌دهنده‌ی میزان خطاهای تصادفی است و هر چه کمیت آن کمتر شود، دقت مدل رگرسیونی افزایش می‌یابد. مجموع مربعات باقیمانده به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود:

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\theta_{wi} - \theta_{ci})^2 \quad (6)$$

که در آن،  $w_i$  عامل وزنی،  $\theta_{wi}$  درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مکش مشخص و  $\theta_{ci}$  درصد رطوبت حجمی محاسبه شده توسط هر مدل در مکش یکسان است. عامل وزنی برابر ۱ در نظر گرفته شد، چون تمامی داده‌ها از نظر اهمیت برابر هستند.

**۲.۶. نتایج تحلیل منحنی مشخصه‌های رطوبتی توسط نرم‌افزار**

**RETC**

مقادیر SSR و پارامترهای به‌دست آمده از مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در تمامی موارد، مقادیر SSR هر دو مدل به حد مطلوبی کم است و برازش قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. در شکل‌های ۷ و ۸، برازش منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه با منحنی‌های حاصل از مدل‌های بروکز - کوری و وان گنوختن مشاهده می‌شوند. همان‌طور که مشخص است، انطباق خوب و قابل قبولی بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های نظری برقرار است.

جدول ۲. مقادیر SSR خاک‌های مورد مطالعه در تحلیل مدل‌های بروکز - کوری و وان گنوختن.

مدل	خاک‌های مورد مطالعه		
	۳	۲	۱
بروکز - کوری	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۸۵۶	۰/۰۰۰۹۹۳
وان گنوختن	۰/۰۰۰۱۲۳	۰/۰۰۰۳۱۳	۰/۰۰۰۴۸۵

## Archive of SID

و بالا بودن نشانه‌ی خمیری نسبت به خاک‌های ۱ و ۲، اختلاف مقادیر و محدوده‌ی نفوذپذیری با سایر خاک‌ها بسیار محسوس است. کمترین مقادیر نفوذپذیری طبق مدل رابطه‌ی ترکیبی معلم و وان گنوختن برای خاک‌های ماسه‌یی، سیلتی و رسی غیراشباع به ترتیب به ازاء مکش‌های  $511/8 \text{ kPa}$ ،  $503/5 \text{ kPa}$  و  $1427 \text{ kPa}$  به دست آمد که به ترتیب برابر  $2/84 \times 10^{-13} \text{ m/s}$  و  $1/87 \times 10^{-12} \text{ m/s}$  و  $8/36 \times 10^{-14} \text{ m/s}$  است. همان‌طور که مشخص است، به دلیل بالا بودن ظرفیت نگه‌داشت بافت رسی، بیشینه‌ی مکش کالبدی طبق رابطه‌ی ترکیبی معلم و وان گنوختن برای خاک رسی ۳ حدوداً  $2/8$  برابر بیشینه‌ی مکش کالبدی خاک‌های ۱ و ۲ است که حاکی از تأثیر زیاد نوع و بافت خاک در خواص هیدرولیکی غیراشباع است.

## ۷. خلاصه و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای پی‌بردن به خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های غیراشباع، مطالعه‌ی موردی روی خاک‌های ماسه‌یی، سیلتی و رسی منطقی نازولی شهرستان ارومیه صورت گرفت. بدین منظور دستگاه صفحه‌ی فشاری برای به دست آوردن منحنی مشخصه‌های رطوبتی خاک‌ها، طراحی و ساخته شدند. منحنی مشخصه‌های رطوبتی آزمایشگاهی با منحنی‌های حاصل از دو مدل وان گنوختن و بروکز-کوری در نرم‌افزار RETC مقایسه شد. در ادامه، مقادیر و تغییرات ضریب نفوذپذیری غیراشباع در مکش‌های مختلف، طبق تحلیل نرم‌افزار RETC با توجه به روابط ترکیبی وان گنوختن و معلم و نیز بروکز - کوری و بوردین به دست آمدند. نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

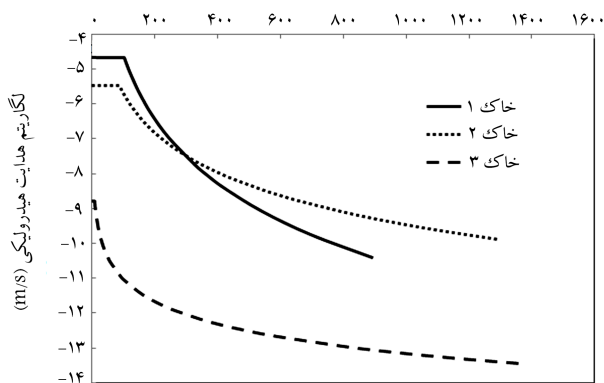
۱. با بررسی و تحلیل منحنی مشخصه‌های رطوبتی نمونه‌های مورد مطالعه مشخص شد که با ریزتر شدن ذرات خاک از ماسه به رس، میزان نگه‌داشت آب در خاک به ازاء مکش مشخص افزایش محسوسی می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر بافت و اندازه‌ی ذرات دانه‌هاست. مقدار درصد رطوبت حجمی خاک ۱ نسبت به خاک ۲ در بیشترین مکش اعمالی ( $1900 \text{ kPa}$ )، افزایشی به میزان  $4/74\%$  و از خاک ۲ به خاک ۳، افزایش  $21/81\%$  را نشان می‌دهد.
۲. شیب ناحیه‌ی بین مکش ورودی هوا و مکش به ازاء درصد رطوبت پسماند، در خاک رسی نسبت به خاک سیلتی و خاک سیلتی نسبت به خاک ماسه‌یی، کمتر و ملایم‌تر است. با ریزتر شدن ذرات خاک از ماسه به رس، مقادیر مکش ورودی هوا، درصد رطوبت پسماند، و درصد رطوبت در بیشترین درجه‌ی اشباع، افزایش محسوسی می‌یابند.
۳. تغییرات مقادیر نفوذپذیری خاک‌ها در مکش‌های مختلف، طبق تحلیل نرم‌افزار RETC زیاد است و با افزایش مکش، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد و شدت کاهش اخیر در خاک ماسه بیشتر است. بنابراین در مسائل ژئوتکنیکی در زمین‌های حاوی خاک‌های ماسه‌یی و سیلتی غیراشباع، باید تغییر شدید مقدار جریان آب در لایه‌ها را در نظر گرفت.

## پانوشته‌ها

1. soil water characteristic curve (SWCC)

2. pressure plate apparatus
3. sintered kaolin
4. contractile skin
5. air-entry value

مکش کالبدی (kPa)



شکل ۱۰. منحنی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک‌های مورد مطالعه در مکش‌های مختلف با مدل بروکز - کوری و بوردین.

مختلف زیاد است و با افزایش مکش، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد. این شدت کاهش به این دلیل است که هر چه خاک غیراشباع‌تر بشود، در ابتدا هوا جایگزین مقداری آب در حفره‌های بزرگ می‌شود و باعث جریان یافتن آب از میان حفره‌های کوچک‌تر و در مسیری با پیچ و خم بیشتر می‌شود. افزایش مکش در خاک منجر به کاهش بیشتر در حجم حفره‌های اشغال شده توسط آب می‌شود و مرز بین آب و هوا (جلد انقباضی) به دانه‌های خاک نزدیک‌تر می‌شود. این پدیده، مقاومت بیشتری را در برابر جریان آب به وجود می‌آورد و هدایت هیدرولیکی فاز آب به شدت کاهش می‌یابد.<sup>[۲۸]</sup>

اثر نوع خاک در اختلاف ضرایب نفوذپذیری و محدوده‌ی مقادیر مکش طبق تحلیل هر دو مدل در نرم‌افزار، بسیار محسوس است. به عنوان مثال، ضریب نفوذپذیری خاک رسی ۳ در حالت اشباع برابر  $1/6 \times 10^{-9} \text{ m/s}$  است و در بیشترین مکش برابر  $1427 \text{ kPa}$  مطابق مدل معلم و وان گنوختن به  $8/36 \times 10^{-14} \text{ m/s}$  کاهش می‌یابد. اما برای خاک ماسه‌یی ۱، ضریب نفوذپذیری در حالت اشباع برابر  $2/8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  است و در بیشترین مکش برابر  $511/8 \text{ kPa}$  مطابق مدل معلم و وان گنوختن، به  $2/84 \times 10^{-13} \text{ m/s}$  کاهش می‌یابد.

شدت کاهش ضریب نفوذپذیری در خاک ۱ نسبت به سایر خاک‌های ریزدانه‌تر بیشتر است. بنابراین، در مناطق حاوی ماسه‌ی غیراشباع، تغییرات نفوذپذیری شدید را در محدوده‌ی مکش پایین باید در نظر گرفت. بنابراین با توجه به نتایج مشاهده شده در شکل‌های ۹ و ۱۰، در مسائل و مطالعات ژئوتکنیکی در زمین‌های حاوی خاک‌های ماسه‌یی و سیلتی با عمق آب زیرزمینی پایین، باید تغییر شدید مقدار جریان آب در لایه‌های غیراشباع را نسبت به خاک‌های ریزدانه در نظر گرفت و در تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌ها لحاظ کرد.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، مقادیر و محدوده‌ی نفوذپذیری خاک‌های ۱ و ۲ به هم نزدیک‌تر است، زیرا بافت و اندازه‌ی ذرات و نشانه‌های خمیری دو خاک ۱ و ۲ به یکدیگر نزدیک است؛ اما در خاک رسی ۳ به دلیل ریزتر بودن ذرات و بافت متفاوت

6. Kelvin
7. adsorption curve
8. desorption curve
9. residual water content
10. saturated water content
11. bubbling pressure
12. Brooks and Corey
13. Van Genuchten
14. Burdine
15. Mualem
16. axis-translation technique
17. Cavitation
18. porous ceramic plate
19. soilmoisture equipment corporation
20. Fredlund
21. sum of squares residual (SSR)

### منابع (References)

1. Miller, C.J., Yesiller, N., Yaldo, K. and et al. "Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **128**(9), pp. 733-742 (2002).
2. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E. "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).
3. Williams, P.J. "The surface of the earth, an introduction to geotechnical science", Longman Inc., New York (1982).
4. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. "An overview of unsaturated soil behavior", *Proceedings ASCE Specialty Series on Unsaturated Soil Properties, Dallas, TX.*, pp. 1-33 (Oct. 24-28, 1993b).
5. Abdul, A., Nishigaki, M., Chegbeleh, L. and et al. "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*, **14**(1), pp. 13-16 (2009).
6. Barbour, S.L. "the soil-water characteristic curve: A historical perspective", *9th Canadian Geotechnical Colloquium, Canadian Geotechnical Journal*, **35**(5), pp. 873-894 (1998).
7. Assouline, S. "Modelling the relationship between soil bulk density and the water retention curve", *Vadose Zone Journal*, **5**(2), pp. 554-562 (2006).
8. Wheeler, S.J. "Inclusion of specific water volume within an elastoplastic model for unsaturated soil", *Canadian Geotechnical Journal*, **33**(1), pp. 42-57 (1996).
9. Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D. and et al. "Relationship of the shear strength of unsaturated soil to the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **33**(3), pp. 440-448 (1996).
10. Mualem, Y. "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, **12**(3), pp. 513-522 (1976).
11. Heshmati, A.A. and Motahari, M.R. "Modeling the dependency of suction stress characteristic curve on void ratio in unsaturated soils", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19**(1), pp. 91-97 (2015).
12. Smith, G.N. and Smith Ian, G.N. "Elements of soil mechanics", Blackwell Science, 7th Edn., pp. 417-419 (1998).
13. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley and Sons, USA (1993).
14. Hillel, D. "Applications of soil physics", Academic Press, San Diego, California (1980).
15. Tinjum, J.M., Benson, C.H. and Blotz, L.R. "Soil-water characteristic curves for compacted clays", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **123**(11), pp. 1060-1069 (1997).
16. Fredlund, D.G. and Xing, A. "Equations for soil-water characteristic curve", *Can. Geotech. J.*, **31**(3), pp. 521-532 (1994).
17. Brooks, R.H. and Corey, A.T. "Hydraulic properties of porous medium", Hydrology Paper, Civil Engineering Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, Colo. (1964).
18. Van Genuchten, M.T. "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, **44**(5), pp. 892-898 (1980).
19. Shwetha, P. and Varijia, K. "Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils", *Aquatic Procedia*, **4**, pp. 1142-1149 (2015).
20. Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C. "Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils", *Soils and Foundations*, **55**(1), pp. 63-73 (2015).
21. Marshall, T.J. "A relation between permeability and size distribution of pores", *Journal of Soil Science*, **9**, pp. 1-8 (1958).
22. Mualem, Y. "Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In Methods of soil analysis", Part 1 Physical and mineralogical methods, 2nd edition, Agronomy, Edited by: A. Klute. American, Inc., Madison. Wis., U.S.A., pp. 799-823 (1986).
23. Burdine, N.T. "Relative permeability calculations from pore size distribution data", *Journal of Petroleum Technology*, **5**(3), pp. 71-78 (1953).
24. Xiaoli, F., Mingan, S.H., Dianqing, L. and et al. "Soil water characteristic curve measurement without bulk density changes and its implications in the estimation of soil hydraulic properties", *Geoderma*, **167-168**, pp. 1-8 (2011).
25. Hilf, J.W. "An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils", Ph.D. dissertation, Tech. Memo. No. 654, U.S. Dep. Of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div., Denver, CO, 654 p. (1956).

## Archive of SID

26. ASTM D 698-07 e1., *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
27. Van Genuchten, M., Leij, F. and Yates, S. "The RETC code quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils", Office of Research and Development Rep. No. EPA/600/2-91/065, Washington, DC, EPA, US (1991).
28. Gallagea, C.H., Kodikarab, J. and Uchimurac T. "Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes", *Soils and Foundations*, **53**(3), pp. 417-430 (2013).