



تعیین منحنی مشخصه آب - خاک یک خاک رس متورم شونده به وسیله دستگاه تحکیم غیر اشباع (مطالعه موردی خانگیران سرخس)

امیرنادی یزدی^۱، علی اخترپور^{۲*}، مصطفی عبدالحسین^۳، امیر عباس ریاحی خو^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه المعقل بصره عراق

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Akhtarpour@um.ac.ir

چکیده

تعیین مشخصات خاک‌های غیراشباع و بررسی رفتار آن‌ها مستلزم به دانستن منحنی نگهداشت آب-خاک برای خاک آن منطقه است از آنجا که هر خاکی منحنی مشخصه منحصر به فرد خود را دارد می‌توان از روی آن منحنی به خصوصیات خاک نظیر اندازه حفرات، دانه‌بندی، نوع کانی و غیره پی برد. منحنی نگهداشت آب-خاک در واقع ارتباط بین درصد رطوبت حجمی و میزان مکش بافتی در خاک را مشخص می‌کند جهت تعیین مکش بافتی از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد که در پژوهش پیش رو از دستگاه تحکیم غیراشباع با قابلیت کنترل مکش و براساس روش انتقال محور انجام گرفت. در ادامه نتایج حاصل از دستگاه تحکیم غیراشباع با استفاده از روابط تحلیلی و منحنی‌های ارائه شده توسط محققین مقایسه گردید. از منظر بررسی نقطه ورود هوا، آزمایشات انجام‌شده و روابط تحلیلی با دقت بسیار خوبی بر هم منطبق هستند. اما از لحاظ رطوبت حجمی اشباع اختلاف ۱۰ درصدی بین نتایج آزمایش و روابط تئوری مشاهده شد.

کلمات کلیدی: مکانیک خاک غیراشباع، منحنی مشخصه آب-خاک، مکش بافتی، رطوبت حجمی، تحکیم غیراشباع

۱. مقدمه

تفاوت میان خاک‌های اشباع و غیراشباع ناشی از رفتار خاک در این دو حالت بسیار اساسی است. خاک‌های غیراشباع که بخش عمده‌ای از مصالح را تشکیل می‌دهند از رفتار خاک‌های اشباع تبعیت نمی‌کنند [۱]. در مقادیر پایین رطوبت موجود در خاک که سبب وجود مکش بافتی بالا در درون توده خاک می‌شود مکانیزم غالب تعیین‌کننده رفتار توده خاک، رژیم‌های جذب سطحی ذرات تشکیل‌دهنده خاک می‌باشند. از طرف دیگر، در مکش‌های کم، مکانیزم غالب ناشی از موئینگی است [۲]. متغیرهای حالت تنش برای خاک غیراشباع، تنش نرمال خالص و مکش بافتی است که برای خاک در این حالت توسعه یافته است [۳،۴].

برای مطالعه رفتار هیدرومکانیکی در محیط‌های چند فازی مانند خاک‌های غیراشباع، شناخت کاملی از خصوصیات مصالح همچون رابطه‌ی بین رطوبت و مکش و مقاومت برشی خاک‌ها مورد نیاز است. منحنی مشخصه‌ی آب-خاک^۱ بیانگر رابطه‌ی بین رطوبت و مکش در خاک‌های غیراشباع می‌باشد. در این راستا تاکنون محققین متعددی با ارائه معادلات تجربی، منحنی مشخصه آب-خاک را ارائه داده‌اند [۵،۶،۷]. همچنین، پژوهشگران روابطی بر پایه‌ی دو متغیر حالت تنش $(\sigma - U_a, U_a - U_w)$ برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع ارائه کردند [۱]. اندازه‌گیری مستقیم نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع در آزمایشگاه اغلب وقت گیر و هزینه‌بر است. از این رو می‌توان از توابع هدایت هیدرولیکی برای این منظور بهره گرفت. میزان درصد رطوبت حجمی و هدایت هیدرولیکی اشباع توسط محققین بسیاری با استفاده از منحنی توزیع اندازه‌ی حفرات تخمین زده شده است. همچنین توابع هدایت هیدرولیکی متعددی جهت پیش‌بینی نفوذپذیری خاک‌ها ارائه گردیده است [۸،۹].

¹ SWCC

در این پژوهش به کمک روابط تحلیلی موجود و نتایج آزمایشگاهی دستگاه تحکیم غیراشباع تلاش به عمل آمده است تا یک منحنی مشخصه آب-خاک منطقه مورد مطالعه تعیین گردد.

۲. مصالح تجهیزات و روش پژوهش ۱.۲. محل نمونه برداری و خصوصیات خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه عملیاتی خانگیران - ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق مشهد و ۲۵ کیلومتری شمال غربی شهر مرزی سرخس، در گستره‌ای به وسعت ۵۰ در ۷۰ کیلومتر مربع - برداشت شده است.



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از منطقه جغرافیایی مورد مطالعه

در این پژوهش علیرغم برداشت نمونه‌های بلوکی جهت تهیه نمونه دست‌نخورده، به دلیل زیر از نمونه بازسازی شده جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد: پراکنندگی خاک در محل: مطابق تصویر زیر در نمونه‌های خاک پراکنندگی جنس خاک و بلورهای نمک و آهک به شدت یافت می‌شد لذا تهیه نمونه خاک که نماینده خاک در محل باشد امکان‌پذیر نبود.



شکل ۲- نمونه خاک

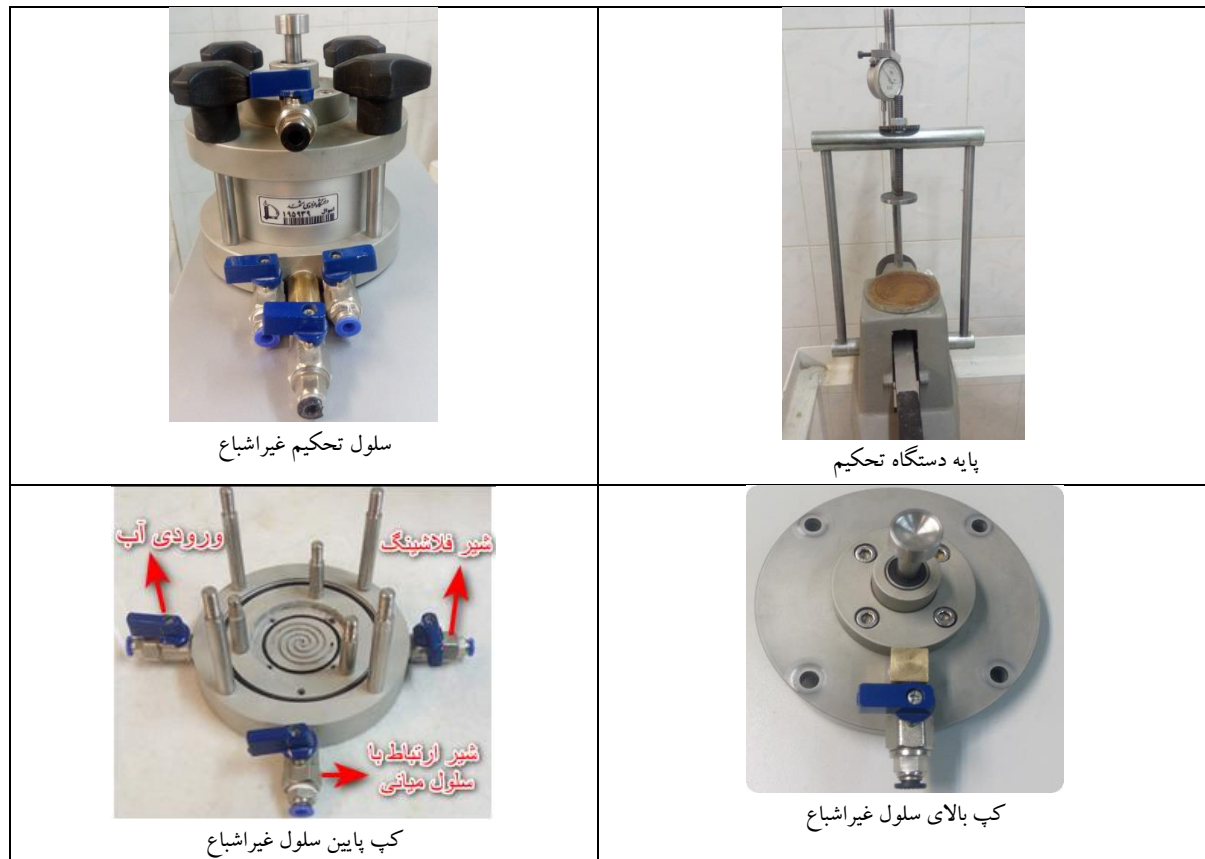
با توجه به آزمایش‌های اولیه صورت گرفته بر روی نمونه‌های خاک، خاک مدنظر بر اساس استاندارد USCS در رده CL قرار گرفت و نتایج سایر آزمایش‌ها نیز در جدول زیر آمده است.

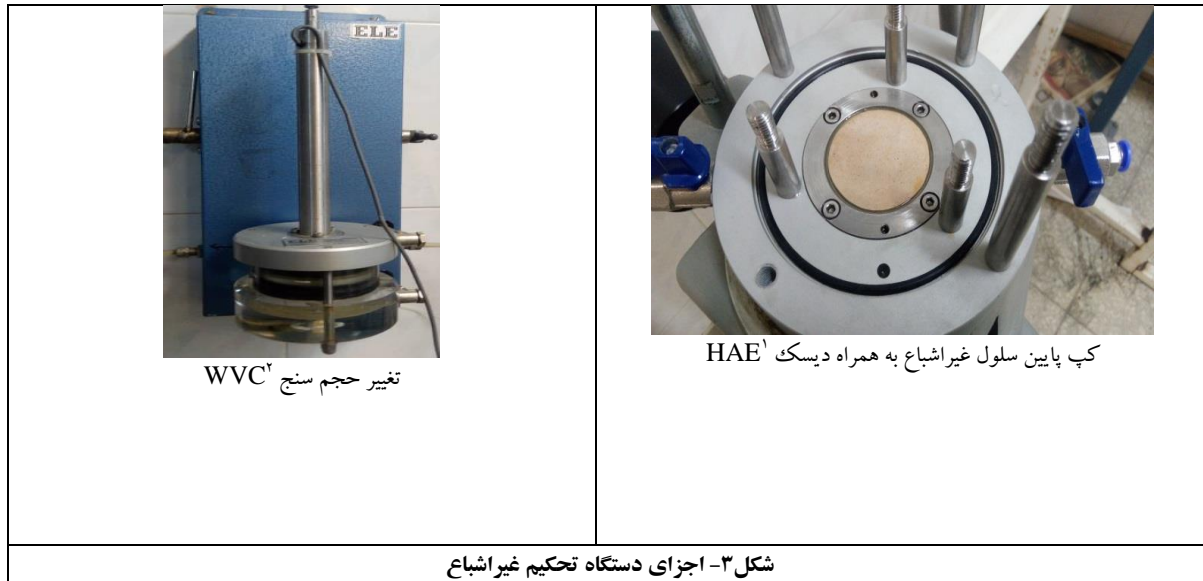
جدول ۱- مشخصات اولیه خاک

نام آزمایش	استاندارد مصرفی	نتایج
دانه بندی	ASTM D 422-63	درصد عبوری از الک ۲۰۰ برابر با ۹۱/۴۳٪
هیدرومتری	ASTM D 421	ترسیم منحنی دانه بندی
چگالی دانه های جامد	ASTM D 854	۲/۷
رطوبت خاک در محل	ASTM D2216-19	۱۹٪
حدود اتربرگ	ASTM D-4318	PL=23% LL=42%
وزن مخصوص ظاهری	ASTM D1556/D1556M	۱/۸۳۷
درصد گچ	ASTM C25-19	۳/۲۱۲

۲.۲. دستگاه و تجهیزات آزمایش

در این پژوهش جهت ترسیم منحنی نگهداشت آب- خاک، نیاز است که دستگاه قابلیت کنترل مکش بافتی را داشته باشد لذا از دستگاه تحکیم غیر اشباع جهت این امر استفاده گردید [۱۰]. دستگاه تحکیم غیر اشباع موجود در آزمایشگاه خاک دانشگاه فردوسی مشهد جهت انجام آزمایش های غیر اشباع ارتقا یافته و با استفاده از این دستگاه نمونه های مورد استفاده در این پژوهش مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. با توجه به روش انتقال محور، نحوه کار این دستگاه به این صورت است که فشار آب مدنظر با استفاده از رگلاتور و سنسور فشار سنج که با فشار آب کار می کند اندازه گیری می شود و پس از تنظیم شدن فشار مدنظر، آب از زیر نمونه به پشت دیسک سرامیکی وارد شده و سپس از طریق روزنه های ریز درون دیسک به خاک منتقل می شود. جهت اعمال فشار هوا نیز پس از اندازه گیری فشار هوای خروجی از رگلاتور از کپ بالای نمونه به نمونه خاک وارد می شود. میزان آب ورودی و خروجی به نمونه خاک نیز از طریق تغییر حجم سنج با دقت ۰/۰۱ میلی متر اندازه گیری می شود.





۳.۲. تعیین منحنی مشخصه آب- خاک^۳ (SWCC)

درصد رطوبت خاک بر روی تمامی مکانیزم های پتانسیل آب و خاک مؤثر است. زمانی که رطوبت خاک کم باشد (یک لایه نازک آب روی سطح ذرات) مکانیسم اصلی مکش خاک ناشی از آثار کوتاه برد جذب سطحی است که این مکانیزم تحت تأثیر سطح ذرات قرار دارد. از طرفی دیگر در مواقعی که رطوبت خاک بالا باشد مکانیزم اصلی حفظ و نگهداری آب حفره‌ای موینگی می‌باشد که خود نیز به ساختار ذرات، حفرات و توزیع اندازه حفرات وابسته است [۱۱]. در تحقیق پیش رو از دو دیسک سرامیکی ۵ بار و ۳ بار جهت تعیین منحنی SWCC در جهت تر اندازی استفاده شد. در دیسک ۵ بار از مکش ۴۲۰ کیلوپاسکال شروع و در هر گام ۲۰ کیلوپاسکال مکش کاهش داده شد تا بعد از حدود ۲۱ روز به مکش صفر برسد در هر گام میزان آب ورودی به نمونه خاک را توسط تغییر حجم سنج ثبت می‌شود و در نهایت با تقسیم حجم آب ورودی به خاک به حجم کل نمونه درصد رطوبت حجمی نمونه در مکش مدنظر بدست می‌آید. در آزمایش بعد همین عملیات با دیسک ۳ بار انجام می‌شود و شروع مکش از ۲۲۰ کیلوپاسکال می‌باشد و در مسیر تر اندازی بعد از ۱۱ روز به مکش صفر می‌رسد. در قسمت بعد به جهت بررسی دقیق‌تر، با استفاده از نرم‌افزار ژئواستودیو بر اساس فرمول اصلاح شده کوواکس که ابرتین و همکاران [۱۲] ارائه کردند، منحنی نگهداشت آب- خاک ترسیم شد که در قسمت بعد به تشریح آن پرداخته خواهد شد.

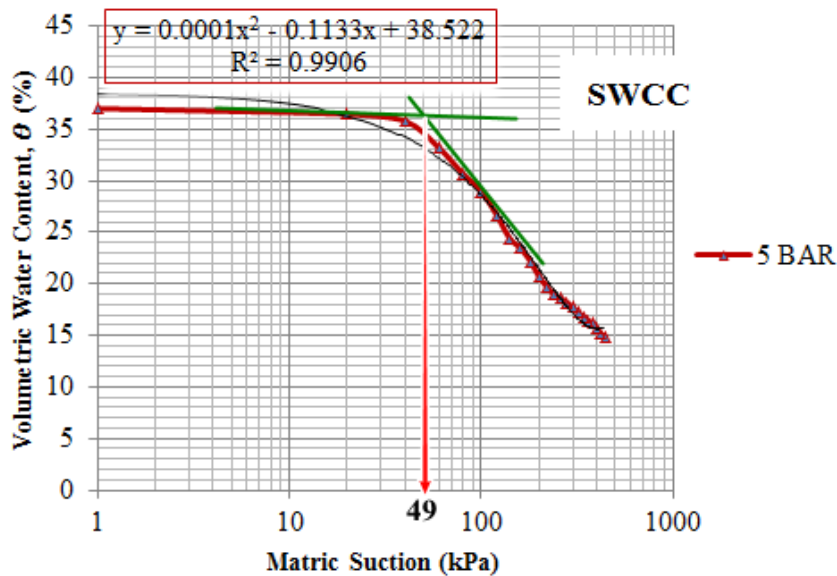
۳. نتایج و تحلیل

در تحقیق حاضر با تغییر مکش در هر گام میزان آب ورودی و خروجی به نمونه خاک اندازه گرفته شد و بعد از آن با فرمول‌های موجود منحنی نگهداشت آب- خاک ترسیم گردید.

^۱ . High Air Entry

^۲ . Water Volume Change

^۳ . Soil Water Characteristic Curve

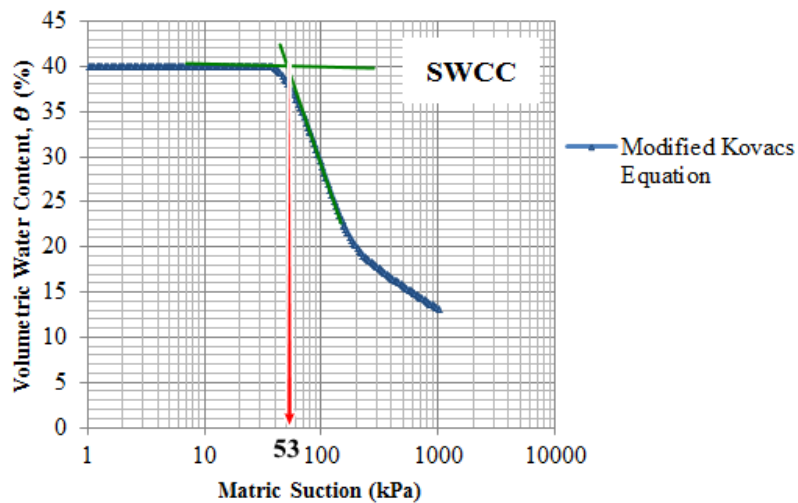


شکل ۴- منحنی نگهداشت آب- خاک با دیسک ۵ بار

با توجه به نمودار فوق تغییرات درصد رطوبت حجمی به ازای تغییر مکش را می‌توان به شکل زیر ارائه کرد که میزان صحت این رابطه با منحنی‌ای که از آزمایش‌ها بدست آمده ۰/۹۹۰۶ است:

$$\theta = 0.0001\psi_m^2 - 0.1133\psi_m + 38.522 \quad (1)$$

به عنوان مثال درصد رطوبت حجمی برای مکش ۵۰ کیلو پاسکال، ۳۳/۱٪ بدست می‌آید که با دقت خوبی مطابق با نمودار است. بدین صورت رابطه ۱ جهت تعیین مکش مربوط به خاک منطقه خانگیران در نظر گرفته شد که در این رابطه بدون در نظر گرفتن سایر پارامتر و تنها با داشتن درصد رطوبت حجمی می‌توان در مورد مکش خاک اظهار نظر کرد.



شکل ۵- منحنی نگهداشت آب- خاک بر اساس فرمول اصلاح شده کوواکس

همان‌طور که از شکل مشخص است نقطه ورود هوا که با استفاده از آزمایش‌های انجام شده در این خاک، ۴۹ کیلو پاسکال است. با مدل‌سازی پارامترهای خاک در نرم‌افزار ژئواستودینو مطابق با شکل نقطه ورود هوا ۵۲ کیلو پاسکال برآورد شد.

مدل اصلاح شده کوواکس



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۲۰ و ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران



در سال ۲۰۰۳ آبرترین و همکاران روشی را به منظور پیش‌بینی منحنی نگهداشت آب-خاک با استفاده از توابع اصلاح شده کوواکس ارائه کردند. از ویژگی‌های این روش این است که می‌تواند منحنی نگهداشت آب-خاک را با استفاده از خواص اولیه خاک که به سهولت در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری است، پیش‌بینی کند.

در این روش درجه اشباع بر اساس دو مؤلفه مطابق معادله ۲ تعریف می‌شود:

- ✓ مؤلفه اول مربوط به مقدار آبی است که وابسته به نیروهای موینگی است و در مکش‌های نسبتاً کوچک وجود دارد.
- ✓ مؤلفه دوم مربوط به عملکرد منحنی نگهداشت آب-خاک در مکش‌های بزرگ است که در آن مقدار آبی که در خاک وجود دارد تابع جذب سطحی است.

$$S_r = \frac{\theta_w}{n} = S_c + S_a^*(1 - S_c) \quad (2)$$

که در آن:

$$S_r = \text{درجه اشباع}$$

$$\theta_w = \text{درصد رطوبت حجمی}$$

$$n = \text{پوکی}$$

$$S_c = \text{درجه اشباع واسطه نیروهای موینگی}$$

$$S_a^* = \text{درجه اشباع واسطه نیروهای چسبندگی } (S_a)$$

S_a^* در این رابطه با استفاده از رابطه (۳-۴) محاسبه می‌شود:

(۳)

$$S_a^* = a C_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{1/6}}$$

$$a = \text{پارامتر برازش منحنی}$$

$$\psi = \text{مکش بافتی}$$

$$\psi_n = \text{پارامتر مکش به منظور بدون بعد کردن مکش}$$

$$e = \text{نسبت تخلخل}$$

$h_{co} =$ متوسط بالاآمدگی موینگی (capillary rise) برحسب سانتی‌متر که با رابطه (۴) یا (۵) تعیین می‌شود:

(۴)

$$h_{co} = \frac{b(cm^2)}{e D_{10}(cm)}$$

و یا:

(۵)

$$h_{co} = \frac{\zeta(w_L^{1.75})}{e}$$

که در آن:

D_{10} قطری که ابعاد ۱۰ درصد از ذرات الک شده از آن کوچک‌تر است (سانتی‌متر)

پارامتر b نیز توسط رابطه (۶) تعریف می‌شود:

(۶)

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \log C_u + 1}$$

که در آن:

$$C_u = \text{ضریب یکنواختی}$$

$W_L =$ حد مایع (درصد)

$\xi =$ ثابت معادله که تقریباً برابر است با $40.2/2$ سانتی متر مربع

$C_\psi =$ ضریب تصحیح معادله که توسط فردلاندر در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شده و رابطه (۴-۷) ارائه شده است. این ضریب امکان کاهش تدریجی درصد حجمی آب را در مکش های بالا فراهم می کند.

(۷)

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r})}$$

که در آن:

$\psi_r =$ مکش مربوط به درصد آب باقیمانده است که در این مقدار با افزایش مکش تغییر چندانی در محتوای آب ایجاد نمی شود و توسط رابطه (۸) تعیین می شود.

(۸)

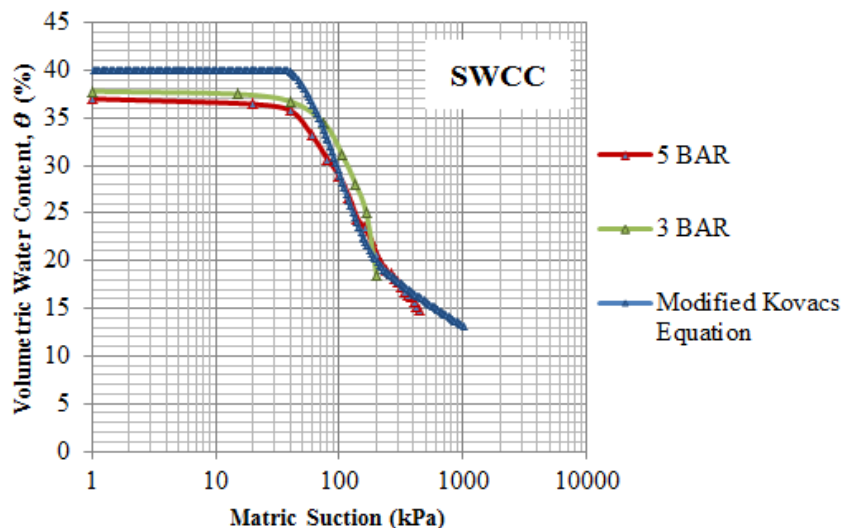
$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\xi}{\rho}\right)^{1.2} W_L^{1.74}$$

درجه اشباع مربوط به موینگی بر اساس قطر منافذ و توزیع اندازه ذرات با استفاده از رابطه (۹) تعیین می شود:

(۹)

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^m \exp \left[-m \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right]$$

$m =$ پارامتری که توزیع اندازه حفرات را در نظر می گیرد و موقعیت تابع نگهداشت آب-خاک را در ناحیه موینگی کنترل می کند. این مقدار برای خاک های چسبنده با پلاستیسیته بالا برابر با 3×10^{-5} است و برای خاک های مویینه برابر ۱ در نظر گرفته می شود.



شکل ۶- منحنی های نگهداشت آب-خاک (SWCC)

در شکل ۶ نیز تمامی منحنی های SWCC که از روش های مختلف بدست آمده آورده شده است که از تطابق قابل قبولی برخوردار است. تنها تفاوت بین نمودارهای آزمایش و نمودار مدل نرم افزار در درصد رطوبت حجمی اشباع است که در آزمایشگاه در مکش صفر هیچگاه به اشباع ۱۰۰ درصد نمی رسد و علت این اختلاف نیز عدم برابری مکش صفر و مکش اشباع است.



1. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons.
2. Lu, N. and Likos, W. J. 2004. Unsaturated soil mechanics, 1st ed, Wiley, Canada.
3. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. 1977. "Stress state variables for unsaturated soils". Journal of Geotechnical Division, 103(5), pp. 447-466.
4. Handoko, L., Yasufuku, N., Oomine, K., and Hazarika, H. 2013. "Suction controlled triaxial apparatus for saturated/unsaturated soil test". International Journal of Geomate, 4(1), pp. 466-470.
5. Ning, L. and William, L., Unsaturated Soil Mechanics, New York: John Wiley, 2004.
6. Fredlund, D.G. and Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian geotechnical journal, 31(4): 521-532.
7. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E., 1999. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Geotechnique, 49(2): 143-159.
8. Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal, 44(5): 892-898.
9. Lam, L., Fredlund, D.G. and Barbour, S.L., 1987. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. Canadian Geotechnical Journal, 24(4): 565-580.
10. Haeri, S.M., et al., *Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. I: experimental investigations*. International journal of geomechanics, 2019. 19(4): p. 04019006
11. Lu, N. and W.J. Likos, Unsaturated soil mechanics. 2004: Wiley.
12. Aubertin, M., J.-F. Ricard, and R.P. Chapuis, A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. Canadian Geotechnical Journal, 1998. 35(1): p. 55-69