Archive of SID

فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
بهار ۱۳۸۵، شماره‌ی سی و سوم، ص. ۷۷-۸۳، (یادداشت فنّی)

# روش پیشنهادی تخمین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک برای خاک‌های چسبنده

یداله پشنگ‌بیشه (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سید مجدالدین میرمحمدحسینی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
نوید گنجیان (دانشجوی دکتری)
مکانیک خاک و پی، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

تعیین مشخصات خاک‌های غیراشباع به‌منظور بررسی رفتار این‌گونه خاک‌ها، مستلزم انجام آزمایشات نسبتاً وقت‌گیر و پرهزینه است. در اغلب موارد، تخمین این پارامترها به‌صورت غیرمستقیم از دقت کافی برخوردار است. منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک (SWCC)[1] در تخمین رفتار خاک‌های غیراشباع، اهمیت و کاربردی ویژه دارد. این منحنی که بیان‌گر رابطه‌ی بین مکش خاک و رطوبت موجود در آن است، با انجام آزمایشات تجربی یا به کمک برخی مشخصات خاک قابل تخمین و پیش‌بینی است. تخمین این منحنی با استفاده از مشخصات خاک نسبت به روش‌های تجربی و آزمایشگاهی ساده‌تر بوده و هزینه‌های کم‌تری در بر دارد. از طرف دیگر طبق تحقیقات به عمل آمده، در روش‌های آزمایشگاهی نیز احتمال بروز خطاهای قابل ملاحظه وجود دارد. در این نوشتار روابطی برای تخمین منحنی SWCC با استفاده از پارامترهای مشخصه‌ی خاک و برمبنای معادله‌ی پیشنهادی ون گنشتاین ارائه شده است. این روابط با بررسی آماری نتایج آزمایشات تعیین مکش بر روی حدود ۶۰ نوع خاک مختلف به دست آمده است. برای تعیین میزان دقت و کارایی روش پیشنهادی، مقایسه‌هایی بین نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج حاصل از این روش صورت گرفته است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از روابط پیشنهادی و نتایج آزمایشات تجربی نشان دهنده‌ی تطابق خوب منحنی‌های تخمینی در اغلب موارد بوده است.

## مقدمه

وجود خاک‌های متنوع غیراشباع در طبیعت سبب شده است تا بررسی رفتار این‌گونه خاک‌ها در دهه‌های اخیر جزو یکی از موضوعات پرطرف‌دار علم مکانیک خاک قرارگیرد. بررسی رفتار خاک‌های غیراشباع، مستلزم تعیین پارامترهای مشخصه‌ی رفتاری در این خاک‌هاست. در طول سه دهه‌ی گذشته مبانی نظریه‌ی مکانیک خاک‌های غیراشباع همراه با معادلاتی برای تعیین تغییر حجم، مقاومت برشی و جریان آب و هوا در این‌گونه خاک‌ها ارائه شده است. اصل اساسی مورد استفاده در این نظریه‌ها این است که رفتار این خاک‌ها نمی‌تواند فقط با استفاده از یک متغیر تنش بیان شود. به‌عبارت دیگر، علاوه بر متغیر تنش کل قائم ($\sigma_n$)، فشار هوای حفره‌یی ($u_a$) و فشار آب حفره‌یی ($u_w$) نیز باید در متغیرهای حالت مستقل در نظر گرفته شوند. این متغیرهای حالت عموماً شامل تنش خالص ($\sigma_n - u_a$) و مکش ماتریسی ($u_a - u_w$) است[1] و بنابراین برای بررسی رفتار این خاک‌ها تعیین میزان مکش امری ضروری است.

تعیین مکش به‌صورت مستقیم مستلزم انجام آزمایشات آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر است و بنابراین تخمین مکش به‌صورت غیرمستقیم براساس پارامتر دیگری نظیر درصد رطوبت مورد توجه محققان قرار گرفته است. از آنجا که در کشور ما هنوز انجام آزمایشات تعیین مکش چندان رایج نشده است، بر میزان اهمیت این امر افزوده می‌شود. از طرف دیگر، در بسیاری از مواقع نیاز به داشتن مکش به‌صورت تابعی پیوسته برحسب میزان رطوبت (به‌منظور مشتق‌گیری یا انتگرال‌گیری) وجود دارد.

با توجه به مطالب مذکور، از منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک که بیان‌گر ارتباط بین میزان رطوبت و مکش در یک خاک مشخص است، برای تخمین پارامترهای مشخصه‌ی خاک‌های غیراشباع استفاده می‌شود. جایگاه این روش از نظر دقت و هزینه در شکل ۱ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.

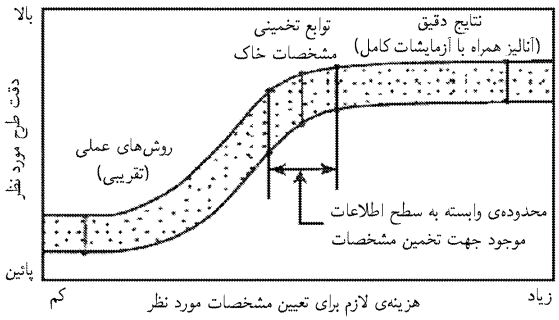
مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که رابطه‌ی نزدیکی میان منحنی مشخصه‌ی خاک، و خواص آن خاک در حالت غیراشباع وجود دارد. بنابراین داشتن یک منحنی دقیق و صحیح از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

در میان کاربردهای عملی منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک می‌توان به تعیین مقاومت برشی، ضریب نفوذپذیری[2] و ضریب نگه‌داشت آب[3] در خاک‌های غیراشباع اشاره کرد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی

www.SID.ir

Archive of SID






**شکل ۱. جایگاه روش‌های تخمین مشخصات خاک‌های غیراشباع از نظر هزینه و دقت.**

برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع پیشنهاد شده است. در بیشتر این روش‌ها از منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم به‌منظور ارتباط دادن مقاومت برشی خاک اشباع و خاک‌های غیراشباع استفاده شده است. به‌عنوان مثال، واناپالی و همکاران معادله‌یی غیرخطی برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع، براساس منحنی مشخصه‌ی خاک (در محدوده‌ی مکش ۰ تا $۱۰^{۶} kPa$) و پارامترهای مقاومت برشی خاک اشباع پیشنهاد کرده‌اند.[۲] امروزه تخمین تابع نفوذپذیری خاک‌های غیراشباع با استفاده از منحنی مشخصه‌ی آنها امری مرسوم شده است. در مطالعه‌ی تحلیلی انتقال آب و جریان‌پذیری خاک‌های غیراشباع (و نیز در مباحث انتقال آلودگی‌ها در خاک)، علاوه بر ضریب نفوذپذیری، تابع نگه‌داشت آب نیز مورد نیاز است. این تابع به‌شدت غیرخطی است و می‌تواند به‌صورت شیب منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک تعریف شود. بنابراین دقت آن شدیداً به دقت منحنی مشخصه‌ی خاک وابسته است.

برای تعیین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک روش‌های مختلفی ارائه شده است. این روش‌ها از دیدگاه کلی به دو روش آزمایشگاهی و تخمین آماری تقسیم می‌شوند. محققان با در نظر گرفتن شکل کلی منحنی‌های مشخصه، معادلاتی را برای تخمین این منحنی‌ها پیشنهاد داده‌اند. معادلات مذکور عمدتاً شامل ۲ یا ۳ پارامتر ثابت‌اند که این پارامترها با توجه به نتایج آزمایشات مکش در رطوبت‌های مختلف (روش آزمایشگاهی) یا با استفاده از روابط آماری مبتنی بر سایر مشخصات خاک مورد نظر تعیین می‌شوند. با توجه به مشکلات موجود در زمینه‌ی تعیین تجربی این منحنی‌ها و خطاهای احتمالی، تخمین آنها با استفاده از روش‌های آماری مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر، یک مدل تخمینی برای تعیین ضرایب ثابت معادله‌ی پیشنهادی ون‌گنشتاین براساس پارامترهای مشخصه‌ی خاک‌های چسبنده ارائه شده است که این پارامترها نشانه‌ی خمیری $(PI)$ و نسبت وزنی عبوری از الک نمره‌ی ۲۰۰ $(W)$ را شامل می‌شوند. در این راستا نتایج آزمایشات تعیین مکش در رطوبت‌های مختلف مربوط به بیش از ۶۰ نمونه خاک مورد مطالعه و بررسی قرارگرفته و با انجام عملیات آماری بر روی نتایج جمع‌آوری شده، معادلاتی به منظور تخمین ضرایب ثابت فوق الذکر و تخمین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک ارائه شده است.

## تعاریف و کلیات

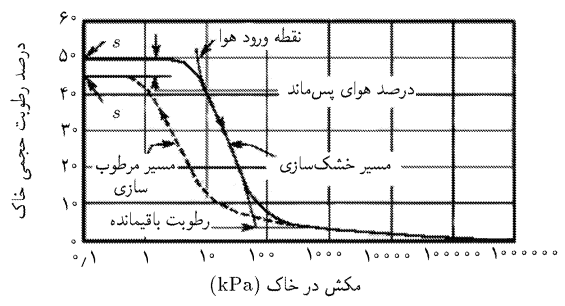
منحنی نگه‌داشت آب[۴] یا منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک به‌عنوان رابطه‌یی میان میزان رطوبت خاک و مکش موجود در خاک تعریف می‌شود.[۳] منحنی‌های مشخصه‌ی خاک‌ها برحسب مورد استفاده، به‌شکل‌های مختلفی ارائه شده‌اند. اغلب محققان پیشنهاد کرده‌اند که منحنی مشخصه به‌صورت رابطه‌ی میان درصد رطوبت حجمی $(\theta)$ و مکش ماتریسی $(u_a - u_w)$ در نظر گرفته شود. درصد رطوبت حجمی به‌صورت نسبت حجم آب موجود در خاک به حجم کل خاک تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_t} = S \cdot n = \frac{S \cdot e}{۱ + e} \qquad (۱)$$

مکش ممکن است به‌صورت ماتریسی (مکش ماتریسی)[۵] و برابر با اختلاف فشار آب و هوای موجود در خاک $(u_a - u_w)$، یا مکش کل که برابر با مجموع مکش‌های ماتریسی و اسموتیک (ناشی از اختلاف غلظت مواد محلول در نقاط مختلف) است، تعریف شود.

شکل ۲ منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک را برای یک خاک لای‌دار نشان می‌دهد.[۴] در این شکل نقاط متناظر با ورود هوا و درصد رطوبت باقی‌مانده نیز نمایش داده شده‌اند. منظور از نقطه‌ی ورود هوا، میزان مکشی است که در آن رطوبت خاک کاهش یافته و هوا شروع به وارد شدن در خاک می‌کند. درصد رطوبت باقی‌مانده نیز، درصد رطوبتی است که در آن برای خروج آب از خاک مکش بسیار زیادی لازم است.

منحنی اصلی (خط پر) در شکل ۲ مسیر خشک شدن خاک را نشان می‌دهد. در خاک‌های غیراشباع، منحنی‌های خشک‌سازی و مرطوب‌سازی بر هم منطبق نیستند. به عبارت دیگر نقطه‌ی انتهایی منحنی مرطوب‌سازی ممکن است متفاوت با نقطه‌ی شروع منحنی خشک‌سازی خاک باشد. علت این پدیده محبوس شدن آب و هوا در خاک است.




**شکل ۲. منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک برای یک خاک لای‌دار.**

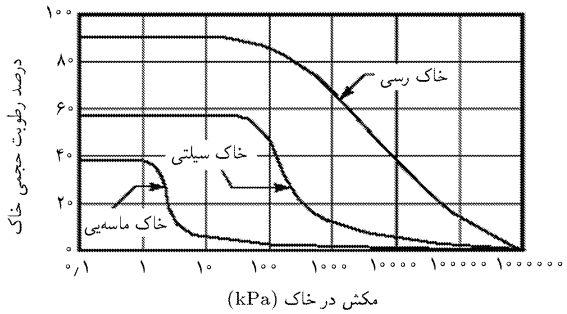


www.SID.ir

Archive of SID

شایان ذکر است که هر دو این مسیرها شکل مشابهی دارند، اما در مسیر خشک‌کردن خاک مقدار مکش بیشتری نسبت به مسیر مرطوب‌سازی خاک (در یک رطوبت برابر) وجود دارد. در اغلب مطالعات انجام شده، روابطی به‌منظور تعیین منحنی نگه‌داشت آب در مسیر خشک‌سازی ارائه شده است. در این نوشتار نیز این منحنی در مسیر خشک‌سازی خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۳ منحنی‌های مشخصه‌ی آب ـ خاک برای خاک‌های




**شکل ۳. منحنی‌های مشخصه‌ی تیپ خاک‌های ماسه‌یی، لای‌دار و رسی.**

مختلف ماسه‌یی، لای‌دار و رسی نشان داده شده است.[۵] ملاحظه می‌شود که درصد رطوبت اشباع ($\theta_s$) و مکش متناظر با نقطه‌ی ورود هوا $(u_a-u_w)_b$، عموماً با افزایش خمیرسانی خاک افزایش می‌یابند. پارامترهای دیگری نظیر تاریخچه‌ی تنش نیز بر شکل این منحنی‌ها مؤثرند.

## روش‌های تعیین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک (SWCC)

به‌طورکلی روش‌های تعیین منحنی SWCC عبارت‌اند از: ۱. روش‌های تجربی بر مبنای عبور دادن منحنی از تعدادی نقاط حاصل از آزمایش؛ ۲. روش تخمین آماری این منحنی بر اساس سایر مشخصات خاک.

**روش‌های تجربی:** در این روش‌ها معادلاتی به‌صورت تجربی برای منحنی‌های SWCC ارائه شده است که معمولاً دارای ۲ یا ۳ ثابت‌اند. مقدار این ثابت‌ها با توجه به یک سری آزمایش تعیین مکش بر روی نمونه‌های خاک مورد نظر محاسبه می‌شوند. از اولین معادلات پیشنهادی، می‌توان به رابطه‌ی بروکس و کری اشاره کرد.[۶] برخی از رایج‌ترین این معادلات فهرست‌وار در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

**جدول ۱. فهرست معادلات پیشنهادی محققان مختلف برای منحنی مشخصه آب ـ خاک.**

| مرجع | توضیح پارامترها | معادله |
|---|---|---|
| Assouline et al. (۱۹۹۸) | $\psi_L$ : ارتفاع کاپیلاری خاک در حداقل رطوبت ممکن$(\theta_L)$<br>$\psi$ : ارتفاع کاپیلاری خاک<br>$\xi,\eta$ : ثابت‌های منحنی | $\theta_w=\theta_L+(\theta_s-\theta_L)\left[1-\exp\left[-\xi\left(\frac{1}{\psi}-\frac{1}{\psi_L}\right)^{\eta}\right]\right]$ (۲) |
| Fredlund & Xing (F & X , ۱۹۹۴) | $C(\psi)$ : تابع تصحیح مکش برای این‌که در مکش $10^6 kPa$ درصد رطوبت به صفر برسد. | $\theta_w=C(\psi)\times\left[\frac{\theta_S}{\{\ln[\exp(1)+(\frac{\psi}{a})^b]\}^c}\right]$ (۳)<br>$C(\psi)=\left[1-\frac{\ln(1+\frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1+\frac{10^6}{\psi_r})}\right]$ (۴) |
| McKee & Bumb (۱۹۸۷) | a,b : ثابت‌های معادله | $\theta_w=\theta_r+\frac{\theta_S-\theta_r}{1+\exp((\psi-a)/b)}$ (۵) |
| Williams et al. (۱۹۸۳) | $A$ و $B$ : ثابت‌های معادله | $\ln\psi=A+B\ln\theta_w$ (۶) |
| Van Genuchten (Van G., ۱۹۸۰ ) | | $\theta_w=\theta_r+\frac{\theta_S-\theta_r}{\left[1+(\frac{\psi}{a})^b\right]^C}$ (۷) |
| Van Genuchten and Mualem (۱۹۸۰) | $b_m$ : پارامتر کنترل کننده‌ی شیب منحنی در نقطه‌ی عطف | $\theta_w=\theta_r+\frac{\theta_S-\theta_r}{\left[1+(\psi/a)^{b_m}\right]^{(1-1/b_m)}}$ (۸) |
| Farrel & Larson (۱۹۷۲) | $\alpha$ : ثابت تجربی | $\psi=a.\exp\left[\alpha(\theta_s-\theta_w)\right]$ (۹) |
| Brooks & Corey (۱۹۶۴) | | $\theta_w=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)\left(\frac{a_b}{\psi}\right)^{b_b}$ (۱۰) |
| Gardner (۱۹۵۸) | | $\theta_w=\theta_r+\frac{\theta_S-\theta_r}{1+\left(\frac{\psi}{a}\right)^b}$ (۱۱) |


www.SID.ir

Archive of SID



برخی ثابت‌های مشترک مورد استفاده در این روش‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

**a**: میزان مکش متناظر با نقطه‌ی ورود هوا در خاک (kPa)؛

**b**: تابعی از نرخ کاهش درصد رطوبت در مکش‌های بیش از نقطه‌ی ورود هوا؛

**c**: تابعی از درصد رطوبت باقی‌مانده در خاک.

سایر پارامترهای مورد استفاده در جدول ۱ یا در بخش فهرست علائم معرفی شده‌اند.

از میان معادلات اشاره شده در این جدول، معادلات پیشنهادی فردلند و زینگ (معادلات ۳ و ۴) و ون گنشتاین (معادله‌ی ۷) از انعطاف‌پذیری و دقت بیشتری نسبت به سایر معادلات برخوردارند، و بنابراین بررسی‌های لازم روی دقت نتایج حاصل از این روابط صورت گرفته است.

فردلند با در نظرگرفتن این نکته که در اغلب خاک‌ها، میزان رطوبت در مکشی برابر $۱۰^۶ kPa$ به صفر می‌رسد، معادله‌ی پیشنهادی خود را تا حدی اصلاح کرده است.

**روش‌های تخمینی**: روش‌های مختلفی برای تخمین منحنی SWCC براساس منحنی دانه‌بندی[۶](GSDC) و سایر مشخصات خاک ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان در غالب سه گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد:

**ـ تخمین آماری رطوبت خاک در هر میزان مکش مشخص**: در این روش با استفاده از اطلاعات موجود در آرشیو و با توجه به مشخصات خاک مورد نظر، برای هر مکش مشخص، درصد رطوبت متناظر به دست آمده و سپس منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک از این نقاط عبور داده می‌شود.[۷-۹]

**ـ تخمین پارامترهای ثابت معادلات تجربی منحنی SWCC براساس رگرسیون آماری**: در این روش‌ها با تحلیل آماری نتایج تجربی، خواص مشخصه‌ی خاک با پارامترهای معرف (ثابت‌ها) در معادلات تجربی پیشنهادی محققان مختلف ارتباط داده می‌شود.[۹و۱۰]

به‌عنوان نمونه، زاپاتا در سال ۲۰۰۰ با انجام بررسی‌های آماری روی منحنی‌های مشخصه‌ی آب ـ خاک، روابطی برای تخمین ضرایب معادله‌ی پیشنهادی فردلند و زینگ (معادله‌ی شماره ۳ از جدول ۱) ارائه داده است.[۱۱]

خاطرنشان می‌شود که روش ارائه شده در این دسته از روش‌ها طبقه‌بندی می‌شود.

**ـ تخمین منحنی SWCC براساس مدل‌های نظری**: در این روش‌ها با استفاده از مدل نظری توزیع اندازه حفرات خاک مورد نظر (PSD) و ارتباط تئوریک آن با میزان مکش و درصد رطوبت، منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک به دست می‌آید.[۱۲]

## مدل تجربی ارائه‌شده در این تحقیق برای تخمین منحنی SWCC

بررسی روابط پیشنهادی توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که معادلات فردلند و ون‌گنشتاین (معادلات ۳ و ۷)، تطابق بهتری با نتایج تجربی حاصل از آزمایشات تعیین مکش دارند. از طرفی چنان که قبلاً ذکر شد با استفاده از معادله‌ی تصحیح شده‌ی فردلند همواره رطوبت خاک در مکشی معادل $۱۰^۶ kPa$ برابر با صفر محاسبه می‌شود که این امر تا حدودی مورد تردید است. در مقابل معادله‌ی ون‌گنشتاین این محدودیت را ندارد و به نظر می‌رسد برحسب نوع خاک و مشخصات آن، رطوبت باقی‌مانده در خاک را با دقت مناسب‌تری تعیین می‌کند.

با توجه به مطالب مذکور و انعطاف‌پذیری یکسان دو معادله و ساده‌تر بودن معادله‌ی ون‌گنشتاین نسبت به معادله‌ی فردلند، در این تحقیق معادله‌ی پیشنهادی ون‌گنشتاین به‌عنوان معادله‌ی پایه انتخاب شده و روابطی بین پارامترهای ثابت این معادله و مشخصات اساسی خاک برقرار شده است. بدین ترتیب با استفاده از این روابط می‌توان بدون نیاز به انجام آزمایشات پرهزینه و وقت گیر، تخمینی از منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک به‌دست آورد.

لازم به ذکر است که رابطه‌ی پیشنهادی ون‌گنشتاین به‌منظور ساده‌سازی (با ناچیز فرض کردن درصد رطوبت باقی‌مانده نسبت به میزان رطوبت خاک $S = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$) براساس درجه‌ی اشباع خاک (S) به شکل معادله‌ی ۱۲ بازنویسی شده و مورد استفاده قرارگرفته است:

$$S = \frac{۱}{\left[۱ + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^c} \qquad (۱۲)$$

برای تعیین ضرایب ثابت معادله‌ی ۱۲، مجموعه‌یی از داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به بیش از ۶۰ نمونه خاک با مشخصات مختلف جمع‌آوری شده است. داده‌های مذکور شامل اطلاعات آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری مکش در رطوبت‌های مختلف و مشخصات خاک مورد آزمایش ($W.PI$) بوده است. عمده‌ی این اطلاعات با استفاده از مجموعه‌ی داده‌های نرم‌افزار Soil Vision[۱۳] و نیز اطلاعات مورد استفاده در رساله‌ی دکترای زاپاتا [۱۴] به دست آمده‌اند.

در جریان این تحقیق سعی شد ضرایب معادله‌ی منحنی SWCC براساس پارامترهای مناسب مشخصه‌ی خاک به دست آیند. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که برای خاک‌های چسبنده ($PI > ۰$) مناسب‌ترین پارامتر، حاصل ضرب نشانه‌ی خمیری در نسبت وزنی ذرات عبوری از الک نمره‌ی ۲۰۰ است.

علت انتخاب پارامتر مذکور ($W.PI$) به‌عنوان پارامتر تأثیرگذار بر منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک را می‌توان چنین بیان کرد:



www.SID.ir

Archive of SID

میزان مکش خاک در یک درجه‌ی اشباع مشخص، تا حد زیادی به سطح مخصوص ذرات خاک بستگی دارد. از طرفی نشانه‌ی خمیری خاک ($PI$) نیز نشانه‌ی مناسبی برای بیان میزان سطح ذرات خاک است. با توجه به این نکته یک خاک محتوی درصد کمی رس با درجه‌ی فعالیت زیاد می‌تواند مقدار $PI$ بالایی را از خود نشان دهد اگر چه سطح مخصوص چندان بالایی نداشته باشد. بنابراین $W.PI$ پارامتر مناسبی به‌منظور تخمین سطح مخصوص ذرات خاک و در نتیجه تخمین مقدار جذب و نگه‌داشت آب است. با انجام تحلیل‌های آماری برنتایج جمع‌آوری شده، روابط ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به‌منظور تخمین ضرایب ثابت مذکور پیشنهاد شده است.

در شکل ۴ منحنی‌های SWCC با استفاده از مدل پیشنهادی در این تحقیق، برای خاک‌های مختلف ترسیم شده‌اند. ملاحظه می‌شود که با افزایش $W.PI$ (افزایش خواص خمیری خاک یا میزان ریزدانه)، مکش متناظر با نقطه‌ی ورود هوا در خاک افزایش می‌یابد.

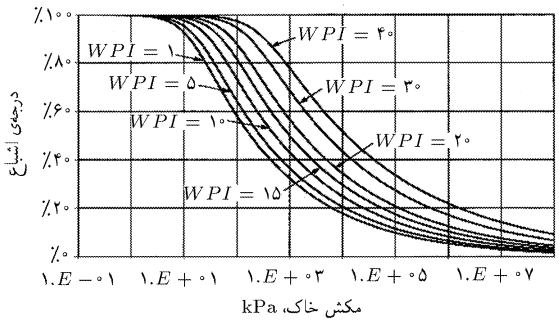
$$a = ۰٫۰۰۱۵\,(W.PI)^۳ + ۰٫۱۰۲۸\,(W.PI)^۲ + ۰٫۵۸۷۱\,(W.PI) + ۱۱٫۸۱۳ \quad (۱۳)$$

$$b = ۰٫۰۰۰۱۱\,(W.PI)^۲ - ۰٫۰۱۳۵۸\,(W.PI) + ۱٫۷۶۹۸۷ \quad (۱۴)$$

$$c = -۵ \times ۱۰^{-۶}\,(W.PI)^۲ - ۰٫۰۰۰۱۴\,(W.PI) + ۰٫۱۴۷۴۵ \quad (۱۵)$$

## مقایسه‌ی نتایج مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی تعیین مکش

برای بررسی دقت مدل ارائه شده در تخمین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک، مقایساتی میان نتایج حاصل از آزمایشات تعیین مکش در آزمایشگاه و نتایج مدل مذکور برای خاک‌های مختلف انجام شده است.




**شکل ۴. منحنی‌های SWCC حاصل از مدل ارائه شده.**

نتایج مقایسات مربوط به ۴ نمونه خاک مختلف در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده‌اند. مشخصات این خاک‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. ضرایب ثابت معادله‌ی ون‌گنشتاین (ضرایب a، b و c) که با استفاده از روابط پیشنهادی محاسبه شده‌اند نیز در این جدول آمده است. چنان که در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایش‌های متناظر، مطابقت قابل قبولی با یکدیگر داشته‌اند. اما این مسئله در مورد رس Fountain Hills(شکل ۸) صادق نیست. این مطلب را می‌توان با درنظرگرفتن وزن مخصوص خشک بسیارکم این مصالح (۱٫۱۴gr/cm$^۳$) توجیه کرد. بنابراین مدل ارائه شده، مدلی تخمینی است که نتایج حاصل از آن ممکن است در مورد مصالح دارای مشخصات خاص (مصالح غیرمعمول) از دقت کافی برخوردار نباشد.

در شکل‌های ۹ تا ۱۲ نتایج آزمایشات تجربی برخی از خاک‌های مورد بررسی در این تحقیق و منحنی‌های حاصل از روابط پیشنهادی ارائه شده است. در این شکل‌ها، نقاط نشان داده شده بیانگر نتایج حاصل از آزمایشات، و خطوط رسم شده، منحنی‌های SWCC حاصل از روابط پیشنهادی در برگیرنده‌ی بازه‌ی مورد بررسی‌اند. خاطرنشان می‌شود در این تحقیق از ۶۰ سری نتایج مربوط به خاک‌های مختلف استفاده شده است که با توجه به عدم امکان و نیز ضروری نبودن ارائه‌ی

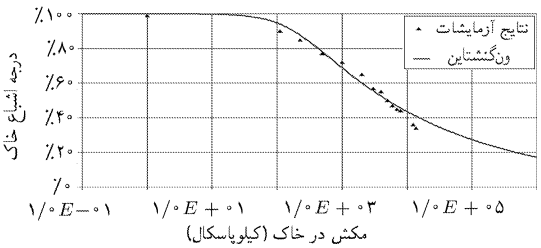
**جدول ۲. مشخصات خاک‌های مورد بررسی و ضرایب ثابت محاسبه شده.**

| خاک | وزن مخصوص خشک (gr/cm۳) | دامنه خمیری (%PI) | نسبت وزنی ریزدانه (w) | ضرایب ثابت تخمینی a | b | c | مرجع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Madrid Gray Clay | ۱٫۳۳ | ۳۱ | ۰٫۹۸ | ۱۶۷ | ۱٫۴۵۹ | ۰٫۱۳۹ | Escario,V. & Juca,J. (۱۹۸۹) |
| Red Silty Clay | ۱٫۸۰ | ۱۴ | ۰٫۸۳ | ۳۵ | ۱٫۶۲۷ | ۰٫۱۴۵ | Escario,V. & Juca,J. (۱۹۸۹) |
| Madrid Clayey Sand | ۱٫۹۱ | ۸ | ۰٫۱۳ | ۱۲٫۵ | ۱٫۷۵۶ | ۰٫۱۴۷ | Escario,V. & Juca,J. (۱۹۸۹) |
| Fountain Hills Clay | ۱٫۱۴ | ۳۵ | ۰٫۹۲ | ۱۸۷ | ۱٫۴۴۷ | ۰٫۱۳۸ | Zapata, C.E. (۱۹۹۹) |

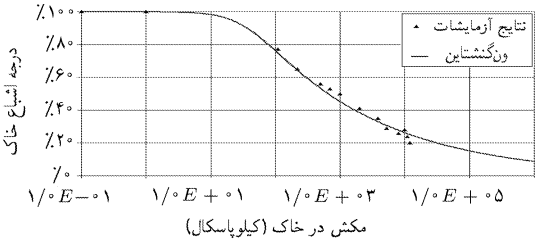

www.SID.ir

Archive of SID

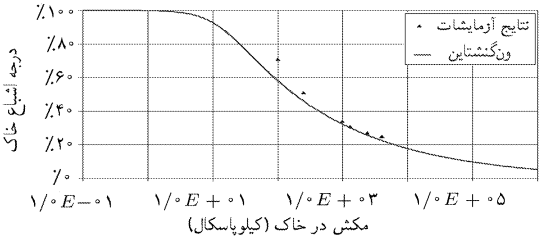




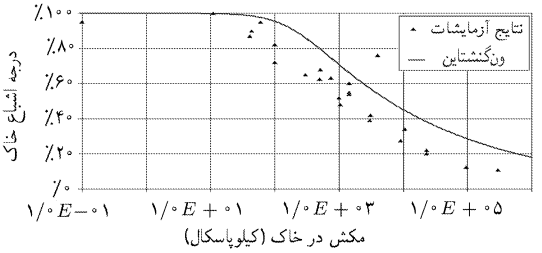

**شکل ۵. مقایسه‌ی منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی رس (Madrid gray clay).**



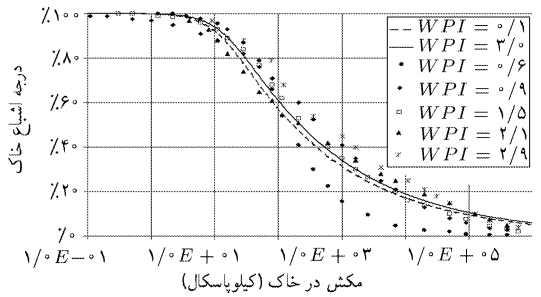

**شکل ۶. مقایسه منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی رس لای‌دار (Red silty clay).**



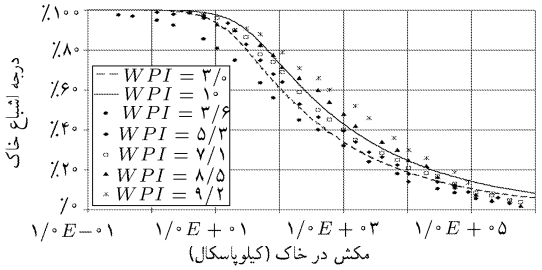

**شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ی رس (Madrid clay sand)**



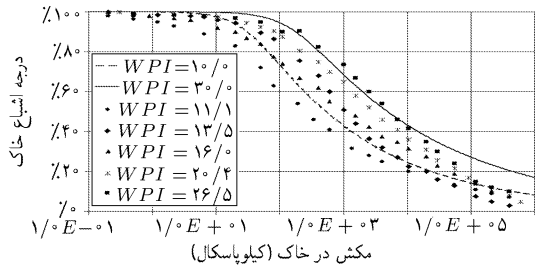

**شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه رس (Fountain Hills Clay).**



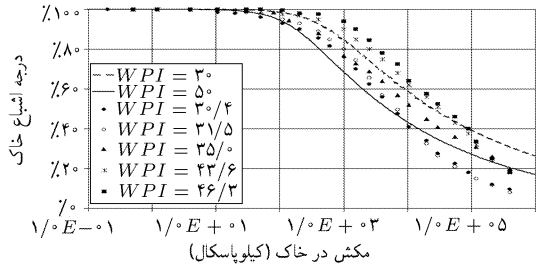

**شکل ۹. نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاک‌های دارای حاصل‌ضرب دامنه‌ی خمیری در درصد ریزدانه ۰٫۱ تا ۳.**




**شکل ۱۰. نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاک‌های دارای حاصل‌ضرب دامنه‌ی خمیری در درصد ریزدانه ۳ تا ۱۰.**




**شکل ۱۱. نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاک‌های دارای حاصل‌ضرب دامنه‌ی خمیری در درصد ریزدانه ۱۰ تا ۳۰.**




**شکل ۱۲. نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاک‌های دارای حاصل‌ضرب دامنه‌ی خمیری در درصد ریزدانه ۳۰ تا ۵۰.**

کلیه‌ی موارد، تنها ۲۰ مورد گزینش شده و در شکل‌های مذکور نشان داده شده‌اند. چنان که در شکل ۹ نشان داده شده است، در مورد خاک‌های دارای $W.PI$ کم‌تر از ۳ اختلاف میان نتایج مدل تخمینی و نتایج آزمایش‌های تعیین مکش قابل ملاحظه است و مدل پیشنهادی از دقت مناسب برخوردار نیست. ولی دقت جواب‌ها در مورد مصالح چسبنده‌ی دارای $W.PI$ بین ۴ تا ۳۰ (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) قابل قبول به نظر می‌رسد. با افزایش $W.PI$ (شکل ۱۲) دقت جواب‌ها در مکش‌های بیش از $10^5 kPa$ کاهش می‌یابد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد فراوان منحنی‌های نگه‌داشت آب و مشکلات موجود در تعیین مستقیم این منحنی‌ها با انجام آزمایشات تجربی لازم، در این تحقیق سعی شده است روشی تخمینی برای تخمین منحنی SWCC خاک‌های چسبنده براساس سایر پارامترهای مشخصه‌ی خاک ارائه شود.



www.SID.ir

Archive of SID

بررسی‌های به عمل آمده بر روی نتایج آزمایشات تجربی نشان داده‌اند که برای خاک‌هایی با دامنه‌ی خمیری بزرگ‌تر از صفر، حاصل‌ضرب دامنه‌ی خمیری خاک در نسبت وزنی ذرات ریزدانه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی آن (عبوری از الک نمره‌ی ۲۰۰)، پارامتر مناسبی برای تخمین منحنی مشخصه‌ی آب ـ خاک است. بنابراین با بررسی آماری اطلاعات تجربی مربوط به بیش از ۶۰ نوع خاک مختلف، روابطی برای تخمین ثابت‌های معادله‌ی پیشنهادی ون گنشتاین براساس حاصل‌ضرب $W.PI$ ارائه شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شده‌اند:

- با افزایش حاصل‌ضرب $W.PI$ خاک، مکش متناظر با نقطه‌ی ورود هوا افزایش یافته و تمایل خاک برای نگه‌داری رطوبت بیشتر می‌شود.
- با توجه به دشواری انجام آزمایشات تعیین مکش و نیز خطاهای محتمل در انجام این آزمایشات، تخمین منحنی‌های SWCC با استفاده از روابطی مشابه با روابط ارائه شده در این نوشتار، راه حل مناسبی به نظر می‌رسد.
- مقایسه‌ی منحنی‌های حاصل از روابط پیشنهادی و نتایج آزمایشات تجربی بیانگر تطابق قابل قبول آنها و دقت مناسب روش تخمینی ارائه شده است. البته این مطلب شامل مصالح خاص (خاک‌های مسئله‌دار) نمی‌شود.
- در مورد مصالح دارای $W.PI$ کم‌تر از ۴، اثر پارامتر $W.PI$ بر منحنی مشخصه و در نتیجه دقت مدل پیشنهادی کم‌تر است و اثر عوامل دیگری نظیر دانه‌بندی مصالح بیشتر به نظر می‌رسد.

## پانوشت

1. Soli-Water Characteristic Curve
2. coefficient of permeability
3. coefficient of water retention
4. water retention curve
5. matrix suction
6. Grain-Size Distribution Curve (GSDC)

## منابع


1. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R., "Stress state variables for unsaturated soils.", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASTM, DT5, 103, GT5, pp. 447- 466 (1977).
2. Vanapalli S. K., Fredlund D. G. ,and Pufahl D. E., "The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till.", *Geotechnical Testing Journal*, **19** (3), pp. 259-268 (1996).
3. Williams, P.J., "The surface of the earth, an introduction to geotechnical science", Longman Inc., New York (1982).
4. Fredlund, D.G. and Xing, A., "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, **31** (3) pp.521-532 (1994).
5. Van Genuchten, M.T., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.", *Soil Science Society of America Journal*, 44 pp.892-898 (1980).
6. Brooks, R.H. and Corey, A.T.,"Hydraulic properties of porous media.", Hydrology Papers, 3. Fort Collins, Colorado State University (1964).
7. Gupta, S.C. and Larson, W.E., "Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution.", Organic Matter Percent and Bulk Density, Water Resources Research, **15** (6) pp. 325-339 (1979).
8. Reddi, L.N. and Poduri, R., "Use of liquid limit state to generalize water retention properties of fine-grained soils.", *Geotechnique*, **47** (5) pp. 1043-1049 (1997).
9. Tomasella, J. and Hodnett, M.G., "Estimating soil water retention characteristics from limited data in brazilian amazonia", *Soil Science*, **163** (3) pp. 190-202 (1998).
10. Williams, J.,et al., "The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic.", *Australian Journal of Soil Research*, **21** pp. 15-23 (1983).
11. Zapata, C.E., Houston,W.N., Houston,S.L., and Walsh, K.D.,"Soil-Water characteristic curve variability." (2001).
12. Arya, L.M. and Paris, J.F., "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density.", *Soil Science Society of America Journal*, **45** (6) pp. 1023-1030 (1981).
13. Soil Vision User's Guide (Version 1.2), [Computer Software], Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Soil Vision System, Ltd (1997).
14. Zapata, C.E.,"Uncertainty in soil-water characteristics curve and impact on unsaturated shear strength predictions.", Ph.D. Dissertatoin, Arizona State University, Tempe, United States (1999).



www.SID.ir