

روشی برای تخمین منحنی مشخصه آب-خاک

در خاکهای چسبنده

یداله پشنگ پیشهⁱ؛ نوید گنجیانⁱⁱ؛ سید مجدالدین میرحسینیⁱⁱⁱ

چکیده

تعیین مشخصات خاکهای غیراشباع برای بررسی رفتار اینگونه خاکها مستلزم انجام آزمایشهای نسبتاً وقت گیر و پرهزینه است. در اغلب موارد، تخمین این پارامترها بصورت غیرمستقیم از دقت کافی برخوردار است. منحنی مشخصه آب-خاک (SWCC) در تخمین رفتار خاکهای غیراشباع، اهمیت و کاربرد ویژه‌ای دارد. این منحنی که بیانگر رابطه بین مکش و رطوبت موجود در خاک است، با انجام آزمایشهای تجربی و یا به کمک برخی مشخصات خاک قابل تخمین و پیش بینی است. تخمین این منحنی با استفاده از مشخصات خاک نسبت به روشهای تجربی و آزمایشگاهی ساده تر و کم هزینه تر است. از طرف دیگر طبق تحقیقات، در روشهای آزمایشگاهی نیز احتمال بروز خطاهای قابل ملاحظه وجود دارد.

در این مقاله روابطی برای تخمین منحنی SWCC با استفاده از پارامترهای مشخصه خاک و بر مبنای معادله پیشنهادی ون گنشتاین ارائه شده است. این روابط با بررسی آماری نتایج آزمایشهای تعیین مکش بر روی حدود ۶۰ نوع خاک مختلف بدست آمده است. برای تعیین میزان دقت و کارایی روش پیشنهادی، نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از این روش مقایسه شده است. این مقایسه نشان دهنده تطابق خوب منحنیهای تخمینی در اغلب موارد است.

کلمات کلیدی

منحنی مشخصه آب-خاک، خاک، غیراشباع، مکش ماتریسی، درصد رطوبت

A New Model for Estimating of Soil Water Characteristic Curve in Cohesive Soils

Y. Pashang Pisheh; N. Ganjian; S. M. Mir Hosseini

ABSTRACT

The measurement of soil parameters for unsaturated soil constitutive models needs extensive laboratory tests. For most practical problems, it has been found that approximate soil properties are adequate for analysis. Thus empirical procedures to evaluate unsaturated soil parameters would be valuable. The soil-water characteristic curve (SWCC) can be used to estimate various parameters, which describe unsaturated soil behavior. The SWCC is a relationship between soil suction and some measure of the water content. It can be measured or predicted based on the soil index properties. Estimation based on the index properties is highly desirable due to its simplicity and low cost.

In this paper, a new model is presented for predicting the SWCC based on the soil index properties and Van Genuchten equation. Comparisons show that the SWCC predicted by this model is in a good agreement with the experimental results.

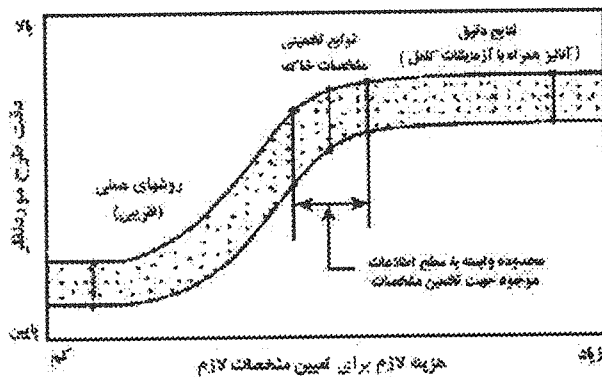
¹ دانشجوی دکتری مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: ypashangpisheh@aku.ac.ir

² دانشجوی دکتری مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده عمران، پردیس های فنی دانشگاه تهران: nganjian@ut.ac.ir

³ دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: smmirhos@aku.ac.ir

KEYWORDS:

Unsaturated soils, Soil-water characteristic curve, Matrix suction, Water content.



شکل (۱): جایگاه روشهای تخمین مشخصات خاکهای غیراشباع از نظر هزینه و دقت

در عمده این روشها از منحنی مشخصه آب- خاک به صورت مستقیم یا غیر مستقیم جهت ارتباط دادن مقاومت برشی خاک اشباع و خاکهای غیراشباع استفاده شده است. به عنوان مثال واناپالی و همکاران [۲] معادله‌ای غیرخطی برای تخمین مقاومت برشی خاکهای غیراشباع بر اساس منحنی مشخصه خاک (در محدوده مکش صفر تا 10^6 kpa) و پارامترهای مقاومت برشی خاک اشباع پیشنهاد نموده‌اند. امروزه تخمین تابع نفوذپذیری خاکهای غیراشباع با استفاده از منحنی مشخصه آنها مرسوم است. در مطالعه تطبیقی انتقال آب و جریان پذیری خاکهای غیراشباع (و نیز در مباحث انتقال آلودگی‌ها در خاک)، علاوه بر ضریب نفوذپذیری، تابع نگهداشت آب نیز مورد نیاز است. این تابع به شدت غیرخطی بوده و می‌تواند به صورت شیب منحنی مشخصه آب- خاک تعریف شود. بنابراین دقت آن وابستگی شدیدی به دقت منحنی مشخصه خاک دارد.

برای تعیین منحنی مشخصه آب- خاک روشهای مختلفی ارائه شده است. این روشها از دیدگاه کلی به دو دسته 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 ثابت هستند که این پارامترها با توجه به نتایج آزمایش‌های تعیین مکش در رطوبت‌های مختلف (روش آزمایشگاهی) و یا با استفاده از روابط آماری مبتنی بر سایر مشخصات خاک مورد نظر تعیین می‌گردند. با توجه به مشکلات موجود در زمینه تعیین تجربی این منحنی‌ها و خطاهای احتمالی، تخمین آنها با استفاده از روشهای آماری مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر، مدلی تخمینی برای تعیین ضرایب ثابت

۱- مقدمه

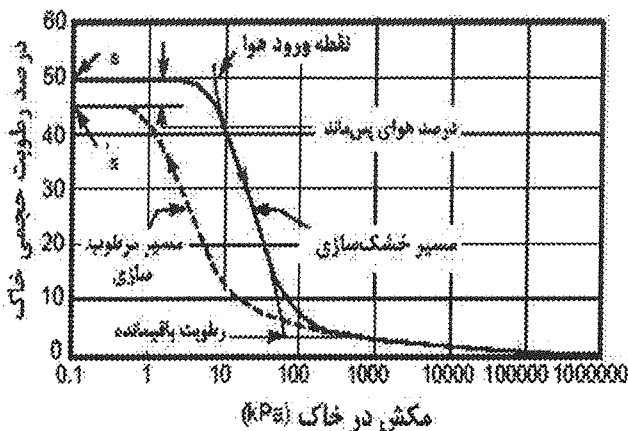
وجود موارد بسیار از خاکهای غیر اشباع در طبیعت سبب شده است تا بررسی رفتار این گونه خاکها در دهه‌های اخیر از موضوعات پر طرفدار علم مکانیک خاک برشمرده شود. بررسی رفتار خاکهای غیر اشباع، مستلزم تعیین پارامترهای مشخصه رفتاری در این خاکها است. در طول سه دهه گذشته مبانی نظری مکانیک خاکهای غیر اشباع ارائه شده و معادلاتی برای تعیین تغییر حجم، مقاومت برشی و جریان آب و هوا در اینگونه خاکها بدست آمده است. اصل اساسی مورد استفاده در این نظریه‌ها این است که رفتار این خاکها نمی‌تواند تنها با استفاده از یک متغیر تنش بیان شود. به عبارت دیگر، علاوه بر متغیر تنش کل قائم (σ_n)، فشار هوای حفره‌ای (u_a) و فشار آب حفره‌ای (u_w) نیز باید در متغیرهای حالت مستقل لحاظ گردند. این متغیرهای حالت، عموماً تنش خالص ($\sigma_n - u_a$) و مکش ماتریسی ($u_a - u_w$) انتخاب می‌شوند [۱]. بنابراین، برای بررسی رفتار این خاکها تعیین میزان مکش ضروری است.

تعیین مکش به صورت مستقیم مستلزم اجرای آزمایش‌های آزمایشگاهی پرهزینه و زمان بر بوده و بنابراین تخمین مکش به صورت غیر مستقیم بر اساس پارامتر دیگری نظیر درصد رطوبت مورد توجه محققان قرار گرفته است. از آنجا که در کشور ما هنوز آزمایش‌های تعیین مکش چندان رایج نشده است، بر میزان اهمیت این امر افزوده می‌شود. از طرف دیگر در بسیاری از مواقع نیاز به داشتن میزان مکش به صورت تابعی پیوسته بر حسب میزان رطوبت وجود دارد.

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

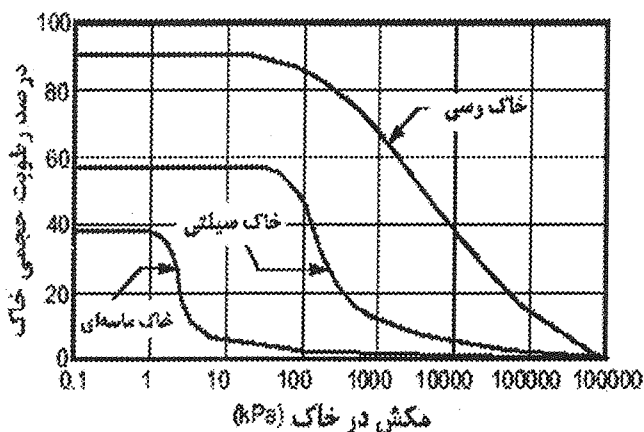
مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که رابطه نزدیکی میان منحنی مشخصه خاک و خواص آن خاک در حالت غیراشباع وجود دارد. بنابر این داشتن یک منحنی دقیق و صحیح از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

از کاربردهای عملی منحنی مشخصه آب- خاک می‌توان به تعیین مقاومت برشی، ضریب نفوذپذیری و ضریب نگهداشت آب در خاکهای غیراشباع اشاره نمود. در سالهای اخیر روشهای مختلفی برای تخمین مقاومت برشی خاکهای غیراشباع پیشنهاد شده است.



شکل (۲): منحنی مشخصه یک خاک لای دار [۴]

شایان ذکر است که هر دو این مسیرها شکل مشابهی دارند، اما در مسیر خشک کردن خاک مقدار مکش بیشتری نسبت به مسیر مرطوب سازی خاک (در یک رطوبت برابر) وجود دارد. در اغلب مطالعات انجام شده، روابطی برای تعیین منحنی نگهداشت آب در مسیر خشک سازی ارائه شده است. در این مقاله نیز هر جا به منحنی مشخصه آب- خاک اشاره شده است، این منحنی در مسیر خشک سازی خاک مورد نظر است. در شکل (۳) منحنی‌های مشخصه تیپ برای خاکهای مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که درصد رطوبت اشباع (θ_s) و مکش متناظر با نقطه ورود هوا $(u_a - u_w)_b$ عموماً با افزایش پلاستیسیته خاک افزایش می‌یابند. پارامترهای دیگری نظیر تاریخچه تنش نیز بر شکل این منحنی‌ها مؤثرند.



شکل (۳): منحنی‌های مشخصه تیپ خاک های ماسه‌ای، لای دار و رسی [۵]

۳- روش های تعیین منحنی مشخصه آب-خاک

به طور کلی روشهای تعیین منحنی SWCC به دو دسته روشهای تجربی بر مبنای عبور دادن منحنی از تعدادی نقاط حاصل از آزمایش و روشهای تخمین آماری این منحنی بر

معادله پیشنهادی ون گنشتاین (Van Genuchten) بر اساس پارامترهای مشخصه خاکهای چسبیده ارائه شده است. این پارامترها شامل نشانه خمیری (PI) و نسبت وزنی عبوری از الک نمرة ۲۰۰ (W) می‌باشند. در این راستا نتایج آزمایش های تعیین مکش در رطوبت‌های مختلف مربوط به بیش از ۶۰ نمونه خاک مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و با انجام عملیات آماری روی نتایج جمع آوری شده، معادلاتی برای تخمین ضرایب ثابت فوق الذکر و در نتیجه منحنی مشخصه آب-خاک ارائه شده است.

۲- تعاریف و کلیات

منحنی نگهداشت آب و یا منحنی مشخصه آب - خاک (Soil-Water Characteristic Curve) به عنوان رابطه ای میان میزان رطوبت خاک و مکش موجود در خاک تعریف می‌شود [۲]. منحنی‌های مشخصه خاک‌ها بر حسب مورد استفاده، به شکل‌های مختلفی ارائه شده‌اند. اغلب محققان پیشنهاد کرده‌اند که منحنی مشخصه مزبور به صورت رابطه میان درصد رطوبت حجمی (θ) و مکش ماتریسی $(u_a - u_w)$ در نظر گرفته شود. درصد رطوبت حجمی به صورت نسبت حجم آب موجود در خاک به حجم کل خاک تعریف می‌شود:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_t} = S \cdot n = \frac{S \cdot e}{1 + e} \quad (1)$$

در رابطه فوق e ، نسبت تخلخل و n درجه اشباع خاک است. مکش به صورت ماتریسی (Matrix Suction) برابر با اختلاف فشار آب و هوای موجود در خاک $(u_a - u_w)$ و یا مکش کل که برابر با مجموع مکشهای ماتریسی و اسموتیک است، تعریف می‌شود.

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

در این شکل منحنی اصلی (خط پر) مسیر خشک شدن خاک را نشان می‌دهد. در خاک های غیراشباع، منحنی‌های خشک سازی و مرطوب سازی بر هم منطبق نیستند. به عبارت دیگر نقطه انتهایی منحنی مرطوب سازی ممکن است متفاوت با نقطه شروع منحنی خشک سازی خاک باشد. علت این پدیده قطبی بودن مولکول های آب و تغییر نیروهای اندرکنش بین آب و ذرات یونیزه شده خاک است.

۳-۱- روشهای تجربی

در این روشها معادلاتی به صورت تجربی برای منحنی‌های SWCC ارائه شده است که معمولاً دارای ۲ یا ۳ ثابت هستند. مقدار این ثابت‌ها با توجه به یک سری آزمایش تعیین مکش بر روی نمونه‌های خاک موردنظر محاسبه می‌شوند. از اولین معادلات پیشنهادی، می‌توان به رابطه بروکس و کری اشاره کرد [۶]. برخی از رایج‌ترین این معادلات به صورت فهرست‌وار در جدول (۱) ارائه شده‌اند. ثابت‌ها و پارامترهای مشترک مورد استفاده در این روشها در بخش فهرست علائم معرفی شده‌اند. از میان معادلات اشاره شده در این جدول، معادلات پیشنهادی فردلند و زینگ (۲) و (۴) و ون گنشتاین (۷) دارای انعطاف پذیری و دقت بیشتری نسبت به سایر معادلات هستند. بنابراین بررسی‌های لازم بر روی دقت نتایج حاصل از این روابط صورت گرفته است.

فردلند با در نظر گرفتن این نکته که در اغلب خاک‌ها میزان رطوبت در مکشی برابر 10^6 kPa به صفر می‌رسد، معادله پیشنهادی خود را تا حدی اصلاح کرده است.

۳-۲- روشهای تخمینی

روشهای مختلفی برای تخمین منحنی SWCC بر اساس منحنی دانه‌بندی (GSD) و سایر مشخصات خاک ارائه شده است. این روشها را می‌توان در غالب سه گروه اصلی تقسیم بندی نمود:

- روشهای 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 بدست آمده و سپس منحنی مشخصه آب- خاک از این نقاط عبور داده می‌شود (گوپتا و لارسن [۷]، ردی و پودوری [۸]، توماسلا و هودنت [۹]).

- روشهای تخمین پارامترهای ثابت معادلات تجربی منحنی SWCC بر اساس رگرسیون آماری: در این روشها با تحلیل آماری نتایج تجربی، خواص مشخصه خاک با پارامترهای معرف (ثابتها) در معادلات تجربی پیشنهادی محققان مختلف

ارتباط داده می‌شود (ویلیامز و همکاران [۱۰]، توماسلا و هودنت [۹]). به عنوان نمونه، زاپاتا [۱۱] در سال ۲۰۰۰ با انجام بررسی‌های آماری روی منحنی‌های مشخصه آب- خاک، روابطی را برای تخمین ضرایب معادله پیشنهادی فردلند و زینگ (۳) ارائه داده است.

خاطر نشان می‌شود که روش ارائه شده در این تحقیق، جزو این دسته از روشها طبقه بندی می‌گردد.

- روشهای تخمین منحنی SWCC بر اساس مدل‌های تئوری: در این روشها با استفاده از مدل تئوری توزیع اندازه حفرات خاک مورد نظر (PSD) و ارتباط تئوریک آن با میزان مکش و درصد رطوبت، منحنی مشخصه آب- خاک به دست می‌آید (اریا و پاریس [۱۲]).

۴- مدل تجربی پیشنهادی برای تخمین منحنی SWCC

بررسی روابط پیشنهادی توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که معادلات فردلند و ون گنشتاین (۳) و (۷)، تطابق بهتری با نتایج تجربی حاصل از آزمایشهای تعیین مکش دارند. از طرفی همانطور که قبلاً ذکر شد با استفاده از معادله تصحیح شده فردلند همواره رطوبت خاک در مکشی معادل 10^6 kPa برابر با صفر محاسبه می‌شود که تا حدودی مورد تردید است. در مقابل، معادله ون گنشتاین این محدودیت را نداشته و به نظر می‌رسد بر حسب نوع خاک و مشخصات آن، رطوبت باقیمانده در خاک را با دقت مناسبی تعیین می‌نماید.

با توجه به مطالب مذکور و انعطاف پذیری یکسان دو معادله و ساده تر بودن معادله ون گنشتاین نسبت به معادله فردلند، در این تحقیق معادله پیشنهادی ون گنشتاین به عنوان معادله 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 آزمایش‌های پرهزینه و وقت گیر، تخمینی از منحنی مشخصه آب- خاک به دست آورد.

جدول (۱): فهرست معادلات پیشنهادی محققان مختلف برای منحنی مشخصه آب- خاک

مرجع	توضیح پارامترها	معادله
Assouline et al. (1998)	ψ_L : ارتفاع کاپیلاری خاک در حداقل رطوبت ممکن (θ_L) ψ : ارتفاع کاپیلاری خاک ξ, η : 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, 1994)	$C(\psi)$: 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)
McKee & Bumb (1987)	a, b : ثابتهای معادله	$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{\psi_r})} \right]$ (۴)
Williams et al. (1983)	A و B : ثابتهای معادله	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \exp((\psi - a)/b)}$ (۵)
Van Genuchten (Van G., 1980)		$\ln \psi = A + B \ln \theta_w$ (۶)
Van Genuchten and Mualem (1980)	b_m : پارامتر کنترل کننده شیب منحنی در نقطه عطف	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right]^c}$ (۷)
Farrel & Larson (1972)	α : ثابت تجربی	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\psi/a)^{b_m} \right]^{(1-1/b_m)}}$ (۸)
Brooks & Corey (1964)		$\psi = a \cdot \exp[\alpha(\theta_s - \theta_w)]$ (۹)
Gardner (1958)		$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a_b}{\psi} \right)^{b_b}$ (۱۰)
		$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b}$ (۱۱)

عمده این اطلاعات با استفاده از مجموعه داده‌های نرم افزار Soil Vision [۱۳] و نیز اطلاعات مورد استفاده در رساله دکتری زاپاتا [۱۴] بدست آمده‌اند.

در جریان این تحقیق سعی شد ضرایب معادله منحنی SWCC بر اساس پارامترهای مناسب مشخصه خاک بدست آیند. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که برای خاک‌های چسبنده مناسب‌ترین پارامتر، حاصلضرب نشانه خمیری در نسبت وزنی ذرات عبوری از الک نمره ۲۰۰ است. علت انتخاب پارامتر مذکور ($W.PI$) به عنوان پارامتر تاثیرگذار بر منحنی مشخصه آب- خاک را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

میزان مکش خاک در یک درجه اشباع مشخص، تا حد زیادی به سطح مخصوص ذرات خاک بستگی دارد. از طرفی نشانه خمیری خاک (PI) نیز نشانه مناسبی برای بیان میزان

یادآور می‌شود که رابطه پیشنهادی ون گنشتاین برای ساده سازی (با فرض ناچیز بودن درصد رطوبت باقی مانده نسبت به میزان رطوبت خاک)، بر اساس درجه اشباع خاک (S) و مکش ماتریسی (ψ) به شکل زیر بازنویسی شده و مورد استفاده قرار گرفته است:

$$S = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right]^c} \quad (۱۲)$$

برای تعیین ضرایب ثابت معادله فوق، مجموعه‌ای از داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به بیش از ۶۰ نمونه خاک با مشخصات مختلف جمع آوری شده است. داده‌های مذکور شامل اطلاعات آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری مکش در رطوبت‌های مختلف و مشخصات خاک مورد آزمایش (w, PI) بوده است.

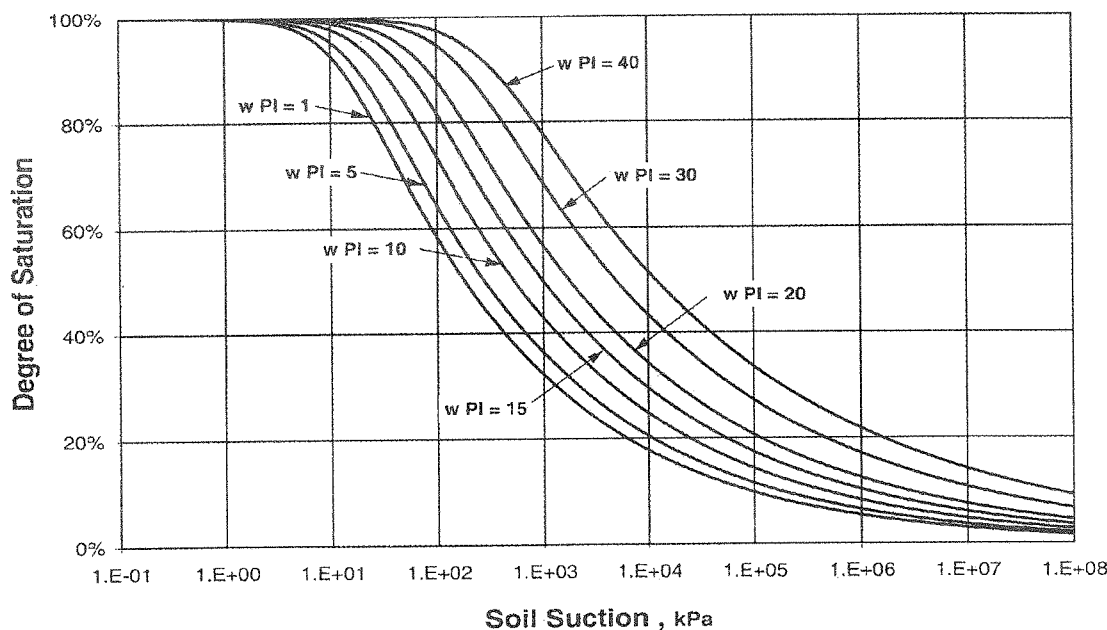
حاصل از آزمایش‌های متناظر عبور نماید (Curve Fitting). بدین ترتیب برای ۶۰ خاک مختلف با حاصلضرب $W.PI$ معلوم، ثابتهای a ، b و c بدست آمده است. با تحلیل‌های آماری بر روی نتایج حاصل (رگرسیون)، روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) برای تخمین ضرایب ثابت مذکور با هدف دستیابی به انحراف از معیار حداقل قابل قبول پیشنهاد شده است.

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

$$a = 0.0015 (W.PI)^3 + 0.1028 (W.PI)^2 + 0.5871 (W.PI) + 11.813 \quad (12)$$

$$b = 0.00011 (W.PI)^2 - 0.01358 (W.PI) + 1.76987 \quad (14)$$

$$c = -5 \times 10^{-6} (W.PI)^2 - 0.00014 (W.PI) + 0.14745 \quad (15)$$



شکل (۴): منحنی‌های $SWCC$ حاصل از مدل ارائه شده

به ۴ نمونه خاک مختلف در شکلهای (۵) تا (۸) نشان داده شده‌اند. مشخصات این خاکها و نیز ضرایب ثابت معادله ون گنشتاین که با استفاده از روابط پیشنهادی محاسبه شده‌اند، در جدول (۲) ارائه شده است.

همانگونه که در شکلهای (۵) و (۶) ملاحظه می‌گردد، نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و نتایج آزمایش‌های متناظر، در مورد خاکهای رسی با مشخصات معمول، مطابقت قابل قبولی

سطح ذرات خاک است. با توجه به این نکته، یک خاک دارای درصد کمی رس با درجه فعالیت زیاد می‌تواند مقدار PI بالایی را از خود نشان دهد، چنانچه دارای سطح مخصوص چندان بالایی نباشد. بنابراین حاصلضرب $W.PI$ پارامتر مناسبی برای تخمین سطح مخصوص ذرات خاک و در نتیجه تخمین مقدار جذب و نگهداشت آب است.

با استفاده از نتایج هر سری از آزمایش‌های تعیین مکش در درصد رطوبتهای مختلف (مجموعه اطلاعات جمع آوری شده)، مقادیر ثابت های a ، b و c در (۱۲) برای هر نمونه خاک به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که منحنی مکش در برابر رطوبت حاصل از رابطه ون گنشتاین با کمترین اختلاف ممکن از نقاط

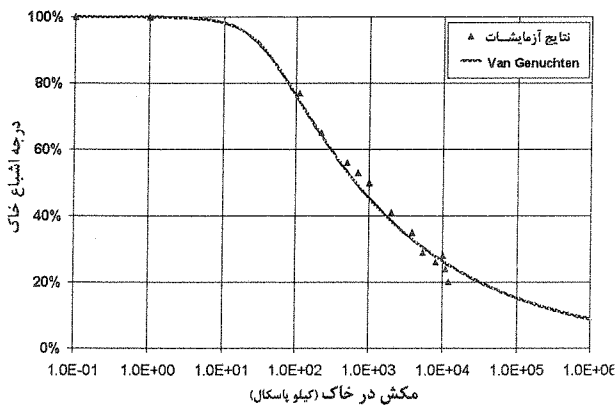
۵- مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با نتایج

آزمایش‌های تجربی تعیین مکش

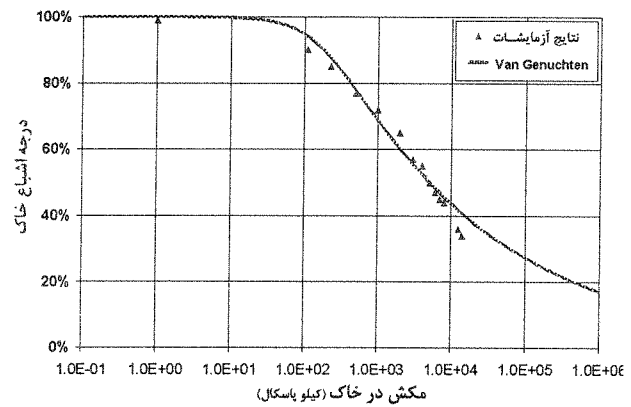
جهت بررسی دقت مدل ارائه شده در تخمین منحنی مشخصه آب-خاک، مقایسه‌هایی میان نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین مکش در آزمایشگاه و نتایج مدل مذکور برای خاکهای مختلف انجام شده است. نتایج مقایسه مربوط

جدول (۲): مشخصات خاکهای مورد بررسی و ضرایب ثابت محاسبه شده

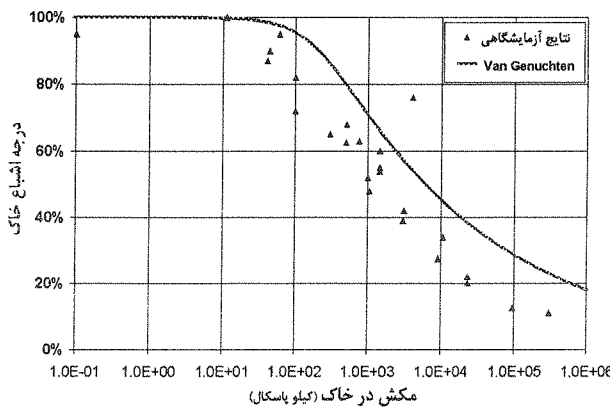
مرجع	ضرایب ثابت تخمینی			نسبت وزنی ریزدانه (W)	دامنه خمیری (%PI)	وزن مخصوص خشک (gr/cm ³)	خاک
	c	b	a				
Escario, V. & Juca, J. (1989)	۰/۱۳۹	۱/۴۵۹	۱۶۷	۰/۹۸	۳۱	۱/۳۳	Madrid Gray Clay
Escario, V. & Juca, J. (1989)	۰/۱۴۵	۱/۶۲۷	۳۵	۰/۸۲	۱۴	۱/۸۰	Red Silty Clay
Escario, V. & Juca, J. (1989)	۰/۱۴۷	۱/۷۵۶	۱۲/۵	۰/۱۳	۸	۱/۹۱	Madrid Clayey Sand
Zapata, C.E. (1999)	۰/۱۳۸	۱/۴۴۷	۱۸۷	۰/۹۲	۳۵	۱/۱۴	Fountain Hills Clay



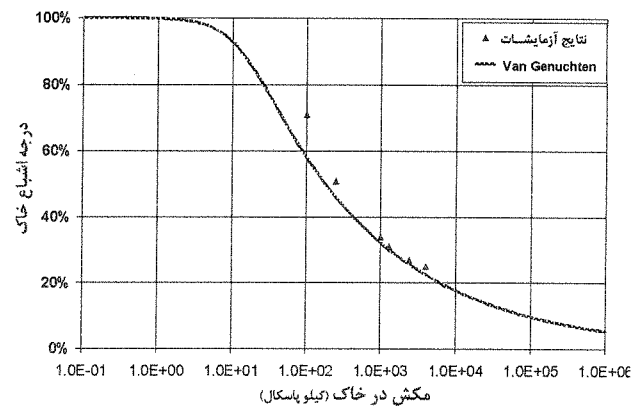
شکل (۶): مقایسه منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه رس لای دار (Red silty clay)



شکل (۵): مقایسه منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه رس (Madrid gray clay)



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



شکل (۷): مقایسه منحنی SWCC حاصل از مدل ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی برای نمونه ماسه (Madrid clayey sand)

را می‌توان با در نظر گرفتن وزن مخصوص خشک بسیار کم این مصالح ($1/14 \text{ gr/cm}^3$) و نیز بالا بودن دامنه خمیری آن توجیه نمود. البته پراکندگی نتایج آزمایش‌های انجام شده نیز نشان دهنده شرایط خاص این خاک و احتمال بالای وجود خطا در روشهای تجربی است. بنابر این مدل ارائه شده، مدلی تخمینی برای خاکهای رسی است که نتایج حاصل از آن ممکن است در مورد مصالح دارای مشخصات خاص (مصالح غیرمعمول) از

در مورد نمونه ماسه‌ای (شکل (۷))، تطابق جوابها خصوصاً در مکشهای پایین کاهش می‌یابد که این امر با توجه به نوع خاک و درصد بسیار کم ریزدانه آن و $W.P.I$ حدود ۱ (همانطور که در ادامه شرح داده می‌شود) قابل پیش بینی بوده است.

مقایسه نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با نتایج آزمایش‌ها در مورد رس Fountain Hills (شکل (۸)) بیانگر اختلاف نسبتاً زیاد (میانگین ۲۵٪) و عدم تطابق کافی جوابها است. این مطلب

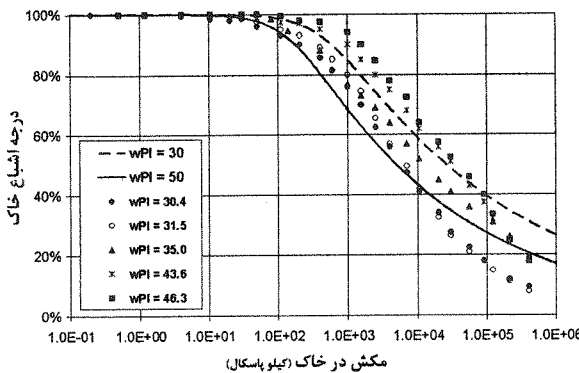
دقت بالا برخوردار نباشد.

در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نتایج آزمایش‌های 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 آزمایش‌ها و خطوط رسم شده، منحنی‌های SWCC طبق روابط پیشنهادی در برگزیده بازه مورد بررسی رسم شده‌اند. خاطر نشان می‌شود در این تحقیق از ۶۰ سری نتایج مربوط به خاکهای مختلف استفاده شده است که با توجه به عدم امکان و نیز ضرورت نداشتن ارائه کلیه موارد، تنها ۲۰ مورد گزینش شده و در شکل‌های مذکور نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، در

مورد خاکهای با دامنه خمیری پایین (غالباً لای) و $W.P.I$ کمتر از ۳، اختلاف میان نتایج مدل تخمینی و نتایج آزمایش‌های تعیین مکش قابل ملاحظه بوده و مدل پیشنهادی دارای خطای نسبتاً بیشتری است. این امر ناشی از اثر بیشتر نحوه توزیع دانه بندی بر منحنی مشخصه آب-خاک در این نوع مصالح است.

دقت جوابها در مورد مصالح چسبنده دارای $W.P.I$ بین ۳ تا ۳۰ (شکل‌های (۱۰) و (۱۱)) قابل قبول و مناسب بوده است. با افزایش $W.P.I$ (شکل (۱۲)) تطابق جوابها در مکش‌های بیش از 10^5 kPa کاهش می‌یابد که این پدیده تا حدی به دلیل مشکلات اندازه‌گیری مکش‌های بالا است.

شکل (۱۱): نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاکهای دارای حاصلضرب دامنه خمیری در درصد ریزدانه ۱۰ تا ۳۰

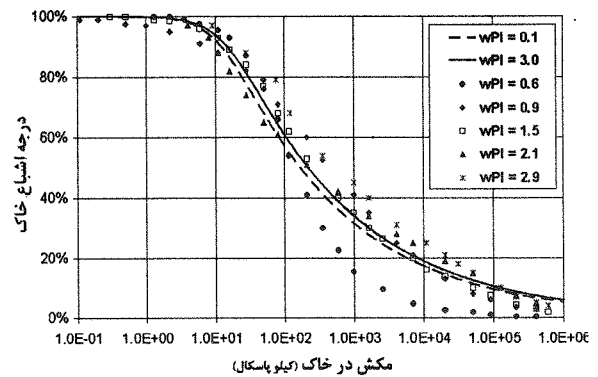


شکل (۱۲): نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاکهای دارای حاصلضرب دامنه خمیری در درصد ریزدانه ۳۰ تا ۵۰

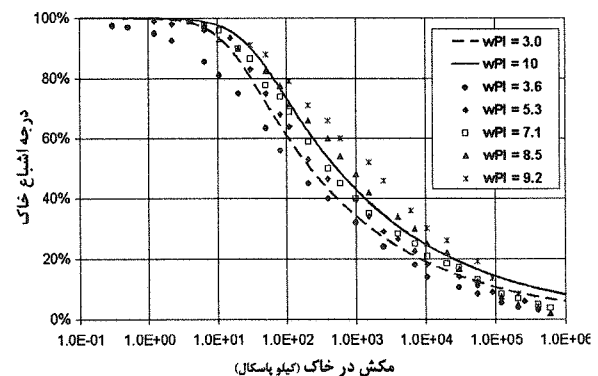
۶- جمع بندی و نتیجه گیری

با توجه به کاربرد فراوان منحنی‌های نگهداشت آب و مشکلات موجود در تعیین مستقیم این منحنی‌ها با انجام آزمایش‌های تجربی لازم، در این تحقیق سعی شده است تا روشی برای تخمین منحنی SWCC خاکهای چسبنده بر اساس سایر پارامترهای مشخصه خاک ارائه گردد. بررسی‌های به عمل آمده بر روی نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داده‌اند که برای خاکهای چسبنده، حاصلضرب دامنه خمیری خاک در نسبت وزنی ذرات ریزدانه تشکیل دهنده آن (عبوری از الک نمرة ۲۰۰)، پارامتر مناسبی جهت تخمین منحنی مشخصه آب-خاک است. بنابراین، با بررسی آماری اطلاعات تجربی مربوط به بیش از ۶۰ نوع خاک مختلف، روابطی جهت تخمین ثابت‌های معادله پیشنهادی و گشتاین بر اساس حاصلضرب $W.P.I$ ارائه شده است.

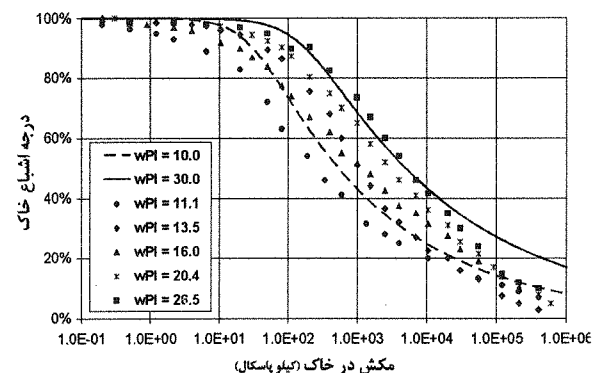
طبق بررسی‌های انجام شده، نتایج ذیل حاصل شده‌اند:



شکل (۹): نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاکهای دارای حاصلضرب دامنه خمیری در درصد ریزدانه ۰/۱ تا ۳



شکل (۱۰): نتایج تجربی و منحنی‌های SWCC خاکهای دارای حاصلضرب دامنه خمیری در درصد ریزدانه ۳ تا ۱۰



آزمایش‌های تجربی بیانگر تطابق قابل قبول آنها و دقت مناسب روش تخمینی ارائه شده است. البته این نتایج، مصالح خاص (خاکهای رسی مساله‌دار) را در بر نمی‌گیرد.

- در مورد مصالح دارای $W.P.I$ کمتر از ۴، اثر پارامتر $W.P.I$ بر منحنی مشخصه و در نتیجه دقت مدل پیشنهادی کمتر بوده و اثر عوامل دیگری نظیر دانه‌بندی مصالح بیشتر به نظر می‌رسد.

[۴] Fredlund, D.G. and Xing, A., "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical Journal, 3(3): 521-532, 1994.

[۵] Van Genuchten, M.T., "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.", Soil Science Society of America Journal, 44:892-898, 1980

[۶] Brooks, R.H. and Corey, A.T., "Hydraulic Properties of Porous Media.", Hydrology Papers, 3. Fort Collins, Colorado State University, 1964.

[۷] 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): 325-339, 1979

[۸] Reddi, L.N. and Poduri, R., "Use of Liquid Limit State to Generalize Water Retention Properties of Fine-Grained Soils.", Geotechnique, 47(5):1043-1049, 1997.

[۹] Tomasella, J. and Hodnett, M.G., "Estimating Soil Water Retention Characteristics from Limited Data in Brazilian Amazonia", Soil Science, 163(3): 190-202, 1998.

[۱۰] Williams, J., et al., "The Influence of Texture, Structure and Clay Mineralogy on the Soil Moisture Characteristic.", Australian Journal of Soil Research, 21: 15-23, 1983.

[۱۱] Zapata, C.E., Houston, W.N., Houston, S.L., and Walsh, K.D., "Soil-Water Characteristic Curve Variability.", 2001.

[۱۲] 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): 1023-1030, 1981.

[۱۳] Soil Vision User's Guide (Version 1.2), [Computer Software], Saskatoon, Saskatchewan, Canada, Soil Vision System, Ltd, 1997.

[۱۴] Zapata, C.E., "Uncertainty in Soil-Water Characteristic Curve and Impact on Unsaturated Shear Strength Predictions.", Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Tempe, United States, 1999.

- با افزایش حاصلضرب $W.P.I$ خاک، مکش متناظر با نقطه ورود هوا افزایش یافته و تمایل خاک جهت نگهداری رطوبت بیشتر می‌گردد.

- با توجه به صعوبت انجام آزمایش‌های تعیین مکش و نیز خطاهای محتمل در انجام این آزمایش‌ها، تخمین منحنی‌های SWCC با استفاده از روابط مشابه با روابط ارائه شده در این مقاله، راه حل مناسبی به نظر می‌رسد.

- مقایسه منحنی‌های حاصل از روابط پیشنهادی و نتایج فهرست علائم

a : مکش متناظر با نقطه ورود هوا در خاک (kPa)

b : تابعی از نرخ کاهش درصد رطوبت در مکش‌های بیش از نقطه ورود هوا

c : تابعی از درصد رطوبت باقیمانده در خاک

e : نسبت تخلخل خاک

n : پوکی خاک

PI : نشانه خمیری

S : درجه اشباع

u_a : فشار هوای منفذی (kPa)

u_w : فشار آب منفذی (kPa)

V_t : حجم کل المان خاک

V_v : حجم حفرات المان خاک

V_w : حجم آب موجود در المان خاک

W : نسبت وزنی ذرات عبوری از الک نمرة ۲۰۰

θ : میزان رطوبت حجمی

θ_s : میزان رطوبت حجمی در حالت اشباع

θ_r : رطوبت حجمی باقی مانده

ψ : مکش ماتریسی (kPa)

ψ_r : مکش ماتریسی باقی مانده (kPa)

ψ_b : مکش ماتریسی متناظر با نقطه ورود هوا (kPa)

مراجع

[۱] Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R., "Stress State Variables for Unsaturated Soils.", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASIM, D15, 103, G15, 447-466, 1977

[۲] 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, 1(8), 259-268, 1996.

[۳] Williams, P.J., "The Surface of the Earth, An Introduction to Geotechnical Science", Longman Inc., New York, 1982.

