

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک

بهزاد قنبریان علویجه، عبدالمجید لیاقت، مهدی شرفا و سامان مقیمی عراقی*

* دانشجوی سابق کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و استادیار دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه تهران، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱، تلفن: ۲۲۴۱۱۱۹ (۰۲۶۱)، پیام‌نگار: behzad1361@gmail.com، و استادیار دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۱۱/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۱/۶

چکیده

منحنی مشخصه رطوبتی خاک یکی از مهم‌ترین خصوصیات خاک در تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی از جمله هدایت هیدرولیکی غیر اشباع است. از آنجا که اندازه‌گیری این ویژگی اجتناب‌ناپذیر است تلاش محققان همواره بر آن بوده تا با روش‌های غیرمستقیم، مانند توابع انتقالی و روابط تجربی، دستیابی به این ویژگی خاک را آسان سازند. در این مطالعه با توجه به ارتباط تنگاتنگ بین منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی دانه‌بندی خاک و با استفاده از هندسه فرکتالی سعی شد تا رابطه‌ای منطقی بین ابعاد فرکتالی این دو منحنی به دست آید تا بر اساس آن بتوان با اندازه‌گیری منحنی دانه‌بندی خاک به عنوان یک ویژگی سهل‌الوصول، منحنی رطوبتی خاک را تخمین زد. به همین منظور از ۴۰ نمونه خاک شامل ۷ بافت مختلف استفاده شد. پس از آن، دو رابطه لگاریتمی برای تعیین بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی (D_p) و منحنی مشخصه رطوبتی (D_s) بر اساس درصد رس آنها با ضریب همبستگی $+0.96$ و $+0.93$ ارائه شد. و سرانجام یک رابطه غیر خطی درجه سه بین دو بعد فرکتالی D_p و D_s با ضریب همبستگی $+0.94$ به دست آمد. برای ارزیابی این رابطه از مشخصات فیزیکی ۵ نمونه خاک با بافت مختلف در استان فارس استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا بر اساس بعد فرکتالی محاسبه شده از منحنی دانه‌بندی، بعد فرکتالی مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی آنها تعیین و منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از مدل ژو تخمین زده شد. به منظور افزایش دقت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی، با ارائه مدل واسنجی و با استفاده از دو نقطه اندازه‌گیری شده از منحنی مشخصه رطوبتی سعی شد تا مقادیر پیش‌بینی شده رطوبت اصلاح شوند. مقادیر واسنجی و اندازه‌گیری شده رطوبت خاک با استفاده از آنالیز پارامترهای آماری خطای استاندارد نسبی (RSE) و ضریب آکائیک (AIC) مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل واسنجی قادر است مقادیر RSE و AIC را به ترتیب از 50 تا 85 درصد و 20 تا 93 درصد کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی

بعد فرکتالی، منحنی دانه‌بندی، منحنی مشخصه رطوبتی

مقدمه

مشخصه خاک پرهزینه و وقت‌گیر است و از این رو نیاز به روش‌های غیر مستقیم به منظور مدل‌کردن آن اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. از روش‌های غیرمستقیم برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌توان به مدل‌های

منحنی مشخصه رطوبتی خاک یکی از مهمترین ویژگی‌های هیدرولیکی مورد نیاز برای مدل‌کردن حرکت جریان در محیط غیر اشباع خاک است. اندازه‌گیری این

تا ۲ متغیر بود. طبیعت محیط متخلخل خاک بعد سه دارد و از این رو به نظر می‌رسد که اسفنج منژر (حالت سه بعدی سنگ فرش سرپینسکی) نمونه دقیق‌تر و بهتری برای مدل کردن محیط خاک باشد. با وجود این، نتایجی را که این دو دانشمند به دست آوردند از اساسی‌ترین تحقیقات در زمینه مدل کردن محیط متخلخل خاک با استفاده از یک شکل فرکتالی بود.

پرفکت (Perfect, 1999)، رابطه‌ای جدید برای مدل کردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک بر اساس مدل فرکتالی اسفنج منژر ارائه داد. بعد فرکتالی تخمین زده شده از ۲/۶ برای بافت خاک لوم شنی تا ۲/۹ برای بافت رسی سیلتی تغییر کرد و تمامی بعدهای به دست آمده مقادیر کمتر از ۳ در سطح ۵ درصد اتخاذ کردند. برای تمامی بافت‌های مورد مطالعه نیز ضریب همبستگی بالایی (۰/۹۶) به دست آورده شد.

ژو (Xu, 2004) رابطه‌ای توانی مشابه رابطه تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1990) با تئوری متفاوت، برای مدل کردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارائه کرد و آن را برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک نیز توسعه داد. مقایسه مدل مذکور با مدل ون گنوختن - معلم نشان داد که پیش‌بینی‌های هدایت هیدرولیک غیر اشباع این مدل، نتایج بهتری نسبت به مدل ون گنوختن - معلم ارائه می‌دهد (Ghanbarian-Alavijeh & Liaghat, 2007).

ابولپور (Abolpour, 1998) در مطالعه‌ای با استفاده از درصد ذرات رس، سیلت، و شن و با محاسبه پارامترهای میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات، ضرائب مدل کمپل (Campbell, 1974) و هاتسن و کاس (Hutson & Cass, 1987) را به منظور پیش‌بینی منحنی

توزیع اندازه خلل و فرج^۱ و توزیع اندازه ذرات خاک (Arya & Paris, 1981; van Genuchten, 1980) توابع انتقالی^۲ (Wösten *et al.*, 1995)، شبکه عصبی مصنوعی (Schaap & Bouten, 1996; Schaap *et al.*, 2001; Minasny & McBratney, 2007) و روش‌های معکوس^۳ (Moench, 2003; Mertens *et al.*, 2006) اشاره کرد. در این خصوص مدل‌های پارامتریک برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک اهمیت خاص دارند.

تا به حال مدل‌های تجربی بسیاری به منظور پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارائه شده است (Brooks & Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Russo, 1988; Leije *et al.*, 1997) در این قبیل مدل‌ها، پارامترهای معادله معمولاً از روش برازش معادله به داده‌های اندازه‌گیری یا از روش توابع انتقالی تخمین زده می‌شوند (Wösten & van Genuchten, 1988; Vereecken *et al.*, 1989).

کاربردهای اخیر هندسه فرکتالی، ابزاری سودمند برای توجیه فیزیکی ضرائب پارامتریک در مدل‌های تجربی ارائه شده است (Tyler & Wheatcraft, 1990; Rieu & Sposito, 1991; Liu & Xu, 2003). با توجه به اینکه محیط متخلخل خاک محیطی خود متشابه است مدل‌های فرکتالی گوناگونی بر مبنای طبیعت فرکتالی ذرات جامد و خلل و فرج خاک یا هر دو ارائه شده‌اند (de Gennes, 1985; Huang & Zhang, 2002).

تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1990) از سنگ‌فرش سرپینسکی برای توصیف توزیع اندازه خلل و فرج در خاک استفاده کردند و یک رابطه توانی مشابه معادلات تجربی ارائه شده توسط بروکز و کوری (Brooks & Corey, 1964) و کمپل (Campbell, 1974) ارائه دادند به طوری که بعد فرکتالی حاصل از مطالعات در محدوده^۱

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

ابعاد فرکتالی فاز جامد (توزیع دانه‌بندی و بافت خاک) و فاز گاز خاک (توزیع اندازه و سطح خلل و فرج خاک) به منظور مدل‌کردن و پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک بسیار قابل استفاده هستند.

تایلر و ویت‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) با استفاده از توزیع جرم ذرات خاک، ریو و اسپوزیتو (Rieu et al., 1991) و فیلگوئرا و همکاران (Filgueira et al., 1999) با استفاده از توزیع جرم خاکدانه‌ها و کراچنکو و ژانگ (Kravchenko & Zhang, 1998) با استفاده از توزیع قطر ذرات خاک به این نتیجه رسیدند که بعد فرکتالی خاک‌ها در محدوده ۲ تا ۳ تغییر می‌کند.

در سال ۱۹۸۹ تایلر و ویت‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1989) منحنی دانه‌بندی به‌دست آمده از آنالیز مکانیکی خاک را بررسی کردند. به منظور محاسبه تعداد ذرات با اندازه l یا $N_v(l)$ ، متوسط اندازه ذره به صورت متوسط اندازه دو الک بالایی و پایینی در نظر گرفته شد. همچنین از تقسیم جرم کل باقیمانده روی هر الک بر متوسط جرم ذرات کروی به اندازه l ، تعداد ذرات با فرض یکسان بودن وزن مخصوص ظاهری تمام ذرات خاک محاسبه شد. با ترسیم پارامتر تعداد ذرات در مقابل اندازه ذرات در یک دستگاه مختصات لگاریتمی، رفتار فرکتالی مشخصی از خاک به‌دست آمد اما بعد فرکتالی حاصل، عددی متجاوز از ۳ یعنی بعد اقلیدسی محاسبه شد که از نظر فیزیکی ناممکن می‌نمود. سه سال بعد (۱۹۹۲) تایلر و ویت‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) نظریه‌ای جدید مطرح کردند. با استفاده از این نظریه، بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک بر اساس توزیع اندازه-جرم ذرات محاسبه می‌شود.

وو و همکاران (Wu et al., 1993) در روشی مشابه با

مشخصه رطوبتی خاک تعیین کرد و نشان داد که برای خاک‌های ریزدانه با بیشترین دامنه پراکندگی قطر ذرات خاک، پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی مناسب است و هر چه بافت خاک درشت‌تر و دامنه ذرات خاک کمتر باشد میزان خطا در برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک بیشتر می‌شود.

قنبریان علویجه و همکاران (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2007) با مقایسه چهار مدل پرفکت (Perfect, 1999)، ون گنوختن (van Genuchten, 1980)، کمپل (Campbell, 1974)، و بروکز و کوری (Brooks & Corey, 1964) به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل فرکتالی پرفکت جهت پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارای دقت نسبتاً قابل قبولی است و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی بافت‌های مختلف خاک استفاده کرد. در حالی که کمترین دقت مربوط به مدل کمپل بود. در نهایت اولویت‌بندی مدل‌های مورد مطالعه در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی به شرح زیر پیشنهاد شده است: برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی در خاک‌های با بافت سبک مانند لوم شنی مدل پرفکت و سپس مدل بروکز و کوری؛ برای خاک‌های با بافت متوسط مانند لوم، لوم سیلتی، و لوم رسی مدل بروکز و کوری؛ و سپس مدل پرفکت؛ و برای بافت‌های سنگین مانند لوم رسی سیلتی، و رسی سیلتی مدل ون گنوختن و سپس مدل پرفکت. در مواردی که مدل پرفکت برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک در اولویت دوم قرار داشت، اختلاف اندکی در مقدار خطای استاندارد نسبی بین دو مدل دیده شد. و سرانجام اینکه مدل فرکتالی پرفکت در پیش‌بینی محیط متخلخلی همچون خاک با بافت‌های مختلف، توصیه شده است.

در این مطالعه از مقادیر متوسط ارائه شده توسط بانک اطلاعاتی *UNSODA* (Huang & Zhang, 2005) استفاده شد همچنین مقدار رطوبت جدانشدنی خاک نیز از منحنی مشخصه رطوبتی اندازه‌گیری و با مقدار به‌دست آمده از نرم افزار *RETC* مقایسه شد. جهت تعیین بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک نیز از روش تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) استفاده گردید و بعد فرکتالی از شیب خط مقدار تجمعی جرم ذرات خاک در مقابل اندازه ذرات در مقیاس لگاریتمی به‌دست آورده شد.

تعیین بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی

برای تعیین بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی از روش ژو (Xu, 2004) استفاده شد. در این روش، خلل و فرج خاک از لحاظ نگهداری آب در منافذشان به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- آن دسته از خلل و فرجی که کاملاً از آب اشباع هستند.

۲- آن دسته از خلل و فرجی که سطح داخلی ذرات خاک با لایه‌ای از آب پوشیده‌اند.

۳- آن دسته از خلل و فرجی که از آب تهی هستند و فقط لایه‌ای بسیار نازک از آب هیگروسکوپیک به سطح ذرات آنها چسبیده است و این آب برای گیاه قابل جذب نیست.

رطوبت نسبی خاک نسبت بین حجم آب داخل خلل و فرج به حجم کل خلل و فرج خاک است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Xu, 2004):

$$\Lambda = \frac{4/3\pi r^3 N(y, r)}{V_v} \quad (1)$$

روشی که تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) به کار گرفتند، منحنی دانه‌بندی خاک را برای محدوده‌ای وسیع از بافت‌ها با چندین روش اندازه‌گیری مختلف (رسوب‌گذاری ذرات^۱، استفاده از الک‌ها^۲، و روش پراکنش نور^۳) بررسی کردند. نتایج به‌دست آمده حاکی از وجود رابطه توانی بین تعداد و اندازه ذرات بود و وجود فرضیه فرکتالی را تصدیق می‌نمود. وو و همکاران (Wu et al., 1993) همچنین متوسط بعد فرکتالی $2/8 \pm 0/1$ را برای ذرات خاکی در محدوده ۵۰ نانومتر تا ۱۰۰ میلی‌متر برای انواع مختلف خاک‌ها با بافت‌های متفاوت ارائه کردند.

هدف اصلی از اجرای این تحقیق، بررسی وجود رابطه‌ای میان بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی دانه‌بندی خاک است. در این صورت با اندازه‌گیری پارامتر زودیافتی همچون منحنی دانه‌بندی می‌توان منحنی مشخصه رطوبتی خاک را پیش‌بینی و با اندازه‌گیری دو نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی در آزمایشگاه، مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده را واسنجی کرد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، جهت بررسی بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی از رابطه‌ای استفاده شد که ژو (Xu, 2004) ارائه داده است. در این رابطه، علاوه بر بعد فرکتالی که از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات به‌دست می‌آید، پتانسیل مکش در نقطه ورود هوا و مقدار رطوبت جدانشدنی خاک نیز از پارامترهای مجهول است که از منحنی مشخصه رطوبتی خاک مستقیماً قابل اندازه‌گیری هستند. نظر به اینکه اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک در مکش‌های پایین جهت تعیین پتانسیل مکش در نقطه ورود هوا نیازمند ابزاری خاص مانند قیف هینز است،

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

$$\Lambda_s = 1 \quad (6)$$

با استفاده از رابطه یانگ-لاپلاس، مقدار پتانسیل ماتریک برای شعاع‌های مختلف از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\psi = \frac{2\tau \cos \alpha}{r} \quad (7)$$

که $r =$ اندازه شعاع خلل و فرج خاک است. پتانسیل ماتریک در نقطه ورود هوا از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$\psi_e = \frac{2\tau \cos \alpha}{R} \quad (8)$$

که $\tau =$ کشش سطحی آب؛ و $\alpha =$ زاویه تماس آب با ذرات خاک است. با جایگذاری روابط ۷ و ۸ در معادلات ۴ و ۵ خواهیم داشت:

$$\frac{\Lambda}{\Lambda_s} = S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_e} \right)^{D-3} \quad (9)$$

در این رابطه، $S_e =$ درجه مؤثر اشباع است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

اندازه‌گیری θ_s به راحتی امکان‌پذیر است اما محاسبه θ_r منوط به استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی

که در آن، $\Lambda =$ رطوبت نسبی؛ $r =$ شعاع خلل و فرج خاک؛ $N(y, r) =$ تعداد خلل و فرج در برگیرنده رطوبت خاک؛ و $V_v =$ حجم کل خلل و فرج خاک است. شکل دیگری از رابطه فوق به شرح زیر است:

$$\Lambda = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

که در آن، $\theta_r =$ درصد رطوبت حجمی باقیمانده در خاک؛ و $\theta_s =$ درصد رطوبت اشباع خاک است. طبق رابطه مندلبروت (Mandelbrot, 1982) خواهیم داشت:

$$N(y, r) = kr^{-D} \quad (3)$$

که در آن، $D =$ بعد فرکتالی؛ $r =$ درجه بزرگنمایی؛ و $k =$ تعداد آغازگراهاست. با جایگزینی رابطه ۳ در رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$\Lambda = \frac{4/3 \pi kr^{3-D}}{V_v} = Ar^{3-D} \quad (4)$$

که در این رابطه، $A =$ مقداری ثابت است. به همین ترتیب مقدار نسبی رطوبت در نقطه اشباع برابر خواهد بود با:

$$\Lambda_s = AR^{3-D} \quad (5)$$

که $R =$ حداکثر شعاع خلل و فرج خاک است. در رطوبت اشباع درجه اشباع برابر یک خواهد بود:

معادله ۱۱ بود:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \quad (11)$$

با محدودیت $2 < D < 3$ ، که در آن، X_i = رطوبت حجمی مشاهده‌ای؛ \hat{X}_i = رطوبت حجمی تخمین زده شده با مدل ژو (Xu, 2004)؛ و n = تعداد داده‌های در دسترس برای هر نمونه خاک است.

مقدار متوسط مکش در نقطه ورود هوا برای بافت‌های مختلف از بانک اطلاعاتی^۲ تعیین شد. در جدول ۱ این مقادیر برای بافت‌های مختلف خاک آورده شده است.

خاک یا جداول موجود برای بافت‌های مختلف خاک خواهد بود. ون گنوختن (van Genuchten, 1980) رطوبت باقیمانده را محتوای رطوبتی از خاک تعریف کرده است که گرادیان رطوبت به پتانسیل ماتریک $\left(\frac{d\theta}{d\psi}\right)$ در بیشترین مکش به سمت صفر میل کند.

بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی نیز، همان گونه که در بالا توضیح داده شد، با استفاده از مدل ژو (Xu, 2004) برای ۴۰ نمونه خاک مورد نظر و با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات^۱ تخمین زده شد. تابع هدف و محدودیت مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده به صورت

جدول ۱- اطلاعات مربوط به مکش در نقطه ورود هوا برای بافت‌های مختلف خاک (Huang & Zhang, 2005)

بافت خاک	ψ_e (سانتی‌متر)	بافت خاک	ψ_e (سانتی‌متر)
لوم رسی شنی	۱۳/۵۳	لوم	۱۰/۱۱
لوم شنی	۱۱/۴۲	لوم سیلتی	۱۲/۰۳
شن لومی	۱۱/۱۸	لوم رسی	۵/۸
رسی	۱۲/۹۲		

تعیین بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک

برای تعیین بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی برای ۴۰ نمونه خاک از روش تایلر و ویست‌کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) بر مبنای مقدار تجمعی اندازه-جرم ذرات خاک استفاده شد. در این روش، با استفاده از آنالیز مکانیکی سرندها منحنی دانه‌بندی بافت‌های مختلف خاک تعیین و با ترسیم مقادیر جرم عبوری از اندازه‌سرند در مقابل اندازه‌سرند در

مقیاس لگاریتمی برای هر نمونه، بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شد.

$$[M \leq l] \propto l^{3-D_p} \quad (12)$$

که $[M \leq l]$ = جرم تجمعی ذرات با اندازه کوچکتر از l ؛ و D_p = بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک است.

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

بزرگ‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر با استفاده از سری الک‌هایی با اندازه ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، و ۰/۱۰۶ میلی‌متر و برای ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر با استفاده از آزمایش هیدرومتری تعیین شد. در آزمایشگاه، مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ۱۰، ۱۵، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد و منحنی مشخصه رطوبتی هم از اندازه‌گیری‌های مقدار رطوبت و پتانسیل مکش به‌دست آمد. مشخصات خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است (Taghizadeh, 2005).

جمع‌آوری داده‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از طالقان و همچنین دشت کرج- آبیگ با آب‌وهوای نیمه‌خشک و بارندگی متوسط سالانه ۲۰۰ میلی‌متر است. به‌طور کلی از ۷ بافت خاک، ۴۰ نمونه از عمق متوسط ۱۰ سانتی‌متر برداشت شد. توده خاک در معرض هوا خشک و بعد از کوبیده‌شدن، نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متر گذرانده شد تا منحنی دانه‌بندی و منحنی مشخصه رطوبتی برای هر کدام از نمونه‌ها تعیین شود. منحنی دانه‌بندی برای ذرات

جدول ۲- مشخصات نمونه خاک‌های مورد مطالعه (Taghizadeh, 2005)

$O.M.(min)$ (درصد)	$O.M.(max)$ (درصد)	$\rho_b(min)$ (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	$\rho_b(max)$ (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	$\rho_s(min)$ (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	$\rho_s(max)$ (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	تعداد نمونه‌ها	بافت خاک
۰/۱۷۲	۲/۲۴۱	۱/۳۱۳	۱/۳۹۷	۲/۴۹۸	۲/۵۹۷	۶	لوم رسی شنی
۰/۳۴۵	۲/۴۱۴	۱/۳۴۸	۱/۵۹۷	۲/۵۱۷	۲/۶۵۱	۱۰	لوم شنی
۰/۵۴۲	۰/۶۹	۱/۶۰۹	۱/۶۱۲	۲/۴۹۸	۲/۵۰۱	۲	شن لومی
۰/۱۷۲	۳/۱۵۳	۱/۴۲۵	۱/۴۸۶	۲/۵۲۵	۲/۶۴۴	۱۴	لوم
۱/۰۳۴	۳/۴۴۸	۱/۴۲۱	۱/۴۶۵	۲/۶۳۲	۲/۶۴۷	۴	لوم سیلتی
۰/۱۷۲	۰/۳۴۵	۱/۳۳۸	۱/۴۴۱	۲/۵۶۲	۲/۶۷۱	۳	لوم رسی
-	۱/۹	-	۱/۳۰۷	-	۲/۶۹۰	۱	رسی

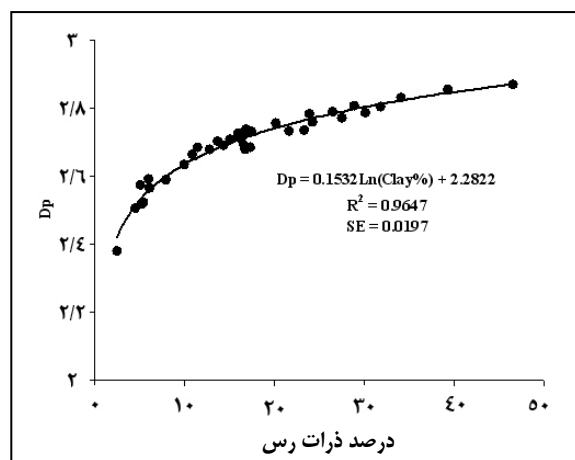
نتایج و بحث

بافت رسی تغییر می‌کند. در حقیقت با افزایش مقدار رس، بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک نیز افزایش می‌یابد. به همین منظور رابطه بین بعد فرکتالی به‌دست آمده از منحنی تجمعی دانه‌بندی خاک و درصد رس با استفاده از برآزش داده‌ها مطابق شکل ۱ به‌دست آمد. شکل نشان می‌دهد که همبستگی خوبی در حد ۰/۹۶ بین بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک و درصد رس وجود دارد.

بر اساس منحنی تجمعی دانه‌بندی خاک و رابطه ارائه‌شده توسط تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992)، بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی (D_p) برای ۴۰ نمونه خاک محاسبه و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار متوسط بعد فرکتالی منحنی تجمعی دانه‌بندی خاک از مقدار ۲/۳۸۰ برای بافت خاک شنی لومی تا ۲/۸۶۸ برای

جدول ۳- اطلاعات مربوط به بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی خاک

شماره نمونه	بافت خاک	درصد رس	D_p	R^2	شماره نمونه	بافت خاک	درصد رس	D_p	R^2
۱	لوم رسی شنی	۲۷/۵۷	۲/۷۷۰	۰/۹۵	۲۱	لوم	۱۵/۹۳	۲/۷۱۶	۰/۸۵
۲	لوم شنی	۱۶/۸۳	۲/۶۷۷	۰/۹۴	۲۲	لوم	۱۵/۹۷	۲/۷۲۶	۰/۸۱
۳	لوم شنی	۱۷/۳۸	۲/۶۸۳	۰/۹۲	۲۳	لوم	۱۵/۰۵	۲/۷۰۸	۰/۸۷
۴	لوم رسی شنی	۳۱/۸۵	۲/۸۰۲	۰/۹۶	۲۴	لوم شنی	۵/۴۷	۲/۵۲۳	۰/۹۰
۵	لوم رسی شنی	۳۰/۱۷	۲/۷۸۴	۰/۹۳	۲۵	لوم رسی شنی	۲۱/۶۰	۲/۷۳۳	۰/۹۴
۶	لوم شنی	۱۶/۶۴	۲/۶۹۱	۰/۹۶	۲۶	لوم سیلتی	۶/۰۱	۲/۵۹۱	۰/۷۰
۷	لوم شنی	۷/۹۵	۲/۵۸۷	۰/۹۲	۲۷	لوم	۲۰/۱۹	۲/۷۵۵	۰/۸۰
۸	لوم رسی شنی	۲۴/۳۱	۲/۷۶۰	۰/۹۸	۲۸	شن لومی	۲/۴۵	۲/۳۸۰	۰/۹۱
۹	لوم	۱۰/۹۰	۲/۶۶۴	۰/۸۲	۲۹	لوم رسی شنی	۲۳/۳۷	۲/۷۳۵	۰/۹۲
۱۰	رسی	۴۶/۶۱	۲/۸۶۸	۰/۹۴	۳۰	لوم شنی	۶/۱۳	۲/۵۶۵	۰/۹۲
۱۱	لوم شنی	۱۰/۰۱	۲/۶۳۴	۰/۸۷	۳۱	لوم	۱۲/۷۷	۲/۶۷۶	۰/۸۷
۱۲	شن لومی	۵/۱۹	۲/۵۱۶	۰/۹۷	۳۲	لوم	۱۳/۷۶	۲/۷۰۲	۰/۸۰
۱۳	لوم	۱۷/۴۸	۲/۷۳۱	۰/۸۳	۳۳	لوم شنی	۴/۵۷	۲/۵۰۵	۰/۸۷
۱۴	لوم	۱۵/۹۶	۲/۷۲۴	۰/۸۲	۳۴	لوم	۱۵/۸۹	۲/۷۱۲	۰/۹۱
۱۵	لوم شنی	۶/۱۴	۲/۵۶۵	۰/۸۸	۳۵	لوم	۲۳/۹۳	۲/۷۸۱	۰/۸۴
۱۶	لوم	۱۶/۶۴	۲/۷۲۸	۰/۸۵	۳۶	لوم سیلتی	۱۱/۴۸	۲/۶۸۳	۰/۷۶
۱۷	لوم سیلتی	۱۶/۸۹	۲/۷۳۸	۰/۷۳	۳۷	لوم رسی	۳۹/۳۰	۲/۸۵۳	۰/۸۹
۱۸	لوم	۱۶/۳۵	۲/۷۰۷	۰/۸۸	۳۸	لوم	۲۶/۵۱	۲/۷۸۸	۰/۸۶
۱۹	لوم شنی	۱۴/۳۸	۲/۶۸۸	۰/۹۲	۳۹	لوم رسی	۳۴/۱۷	۲/۸۳۱	۰/۸۶
۲۰	لوم سیلتی	۵/۱۴	۲/۵۷۴	۰/۷۱	۴۰	لوم رسی	۲۸/۸۹	۲/۸۰۶	۰/۸۶



شکل ۱- رابطه بین بعد فرکتالی منحنی تجمعی دانه‌بندی و درصد ذرات رس برای ۴۰ نمونه خاک مورد مطالعه

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

روندی مشابه روند افزایشی رابطه بین بعد فرکتالی منحنی تجمعی دانه‌بندی و درصد ذرات رس دارد که با نتایج مطالعات پرفکت (Perfect, 1999) مطابقت می‌کند. که در آن مقادیر بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی خاک از ۲/۶ برای بافت خاک لوم شنی تا ۲/۹ برای بافت رسی سیلتی گزارش شده و حاکی از وجود روندی افزایشی از پارامتر بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و مقدار رس خاک است.

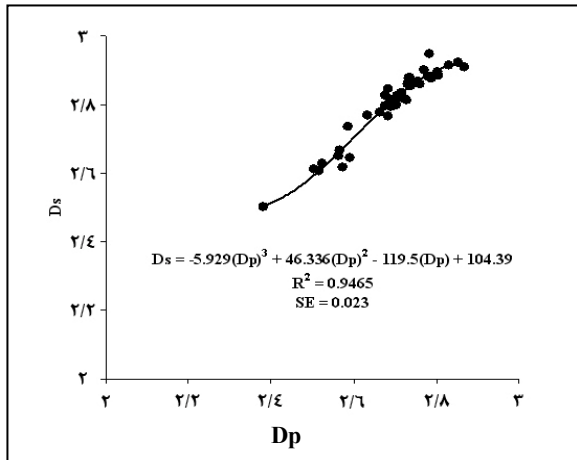
رابطه بین بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی ذرات خاک نیز بررسی شد. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که رابطه بین این دو پارامتر رابطه‌ای غیرخطی درجه سه با ضریب همبستگی ۰/۹۴ است.

مقادیر بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از مدل ژو (Xu, 2004) برای ۴۰ نمونه خاک مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به این جدول، مقادیر بعد فرکتالی حاصل از منحنی مشخصه رطوبتی از ۲/۴۴۴ برای خاک شنی لومی تا ۲/۹۱۸ برای خاک رسی تغییر می‌کند. این جدول همچنین نشان می‌دهد که با افزایش رس، مقدار بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی افزایش می‌یابد.

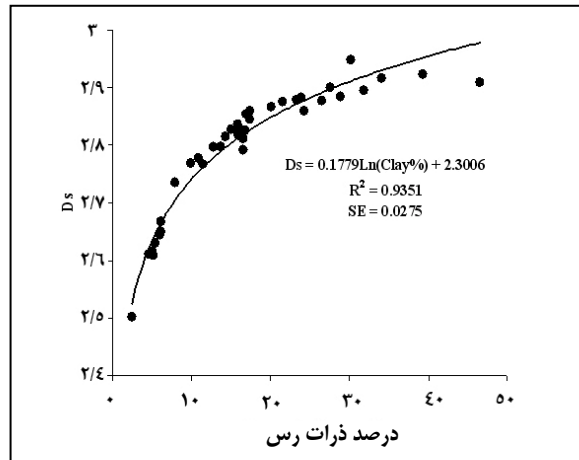
شکل ۲ برازش داده‌های مقادیر بعد فرکتالی حاصل از منحنی مشخصه رطوبتی (D_s) و مقادیر رس را با ضریب همبستگی بالا ($R^2=0/93$) نشان می‌دهد. در این شکل می‌بینیم که با افزایش درصد رس خاک بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی نیز افزایش می‌یابد و این افزایش

جدول ۴- اطلاعات مربوط به بعد فرکتالی به دست آمده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	D_s	R^2	شماره نمونه	D_s	R^2	شماره نمونه	D_s	R^2
۱	۲/۸۸۶	۰/۹۹۹	۱۵	۲/۵۸۰	۰/۹۷۲	۲۹	۲/۸۷۰	۰/۹۹۰
۲	۲/۸۰۹	۰/۹۷۸	۱۶	۲/۸۱۰	۰/۹۸۵	۳۰	۲/۵۸۰	۰/۹۷۰
۳	۲/۸۱۰	۰/۹۷۸	۱۷	۲/۸۱۱	۰/۹۸۴	۳۱	۲/۸۰۸	۰/۹۹۰
۴	۲/۸۹۷	۰/۹۵۰	۱۸	۲/۸۰۷	۰/۹۸۵	۳۲	۲/۸۱۹	۰/۹۹۲
۵	۲/۸۹۴	۰/۹۹۸	۱۹	۲/۷۷۶	۰/۹۷۷	۳۳	۲/۵۰۷	۰/۹۷۰
۶	۲/۸۰۳	۰/۹۷۷	۲۰	۲/۶۴۹	۰/۹۹۷	۳۴	۲/۸۳۹	۰/۹۹۲
۷	۲/۶۴۲	۰/۹۷۳	۲۱	۲/۸۰۲	۰/۹۸۵	۳۵	۲/۸۸۶	۰/۹۹۳
۸	۲/۸۷۴	۰/۹۹۸	۲۲	۲/۸۰۲	۰/۹۸۵	۳۶	۲/۷۸۳	۰/۹۹۷
۹	۲/۷۲۷	۰/۹۸۳	۲۳	۲/۷۹۲	۰/۹۸۴	۳۷	۲/۹۱۰	۰/۹۹۸
۱۰	۲/۹۱۸	۰/۹۹۹	۲۴	۲/۵۵۱	۰/۹۷۰	۳۸	۲/۸۹۵	۰/۹۹۳
۱۱	۲/۶۹۸	۰/۹۷۴	۲۵	۲/۸۶۱	۰/۹۹۸	۳۹	۲/۹۰۲	۰/۹۹۹
۱۲	۲/۵۷۸	۰/۹۹۰	۲۶	۲/۶۷۷	۰/۹۹۷	۴۰	۲/۸۹۰	۰/۹۹۹
۱۳	۲/۸۱۷	۰/۹۸۵	۲۷	۲/۸۳۹	۰/۹۸۶			
۱۴	۲/۸۰۲	۰/۹۸۵	۲۸	۲/۴۴۴	۰/۹۸۰			



شکل ۳- رابطه بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و بعد فرکتالی منحنی تجمعی دانه‌بندی



شکل ۲- رابطه بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و درصد ذرات رس خاک‌های مورد مطالعه

صحت‌سنجی مدل

به منظور بررسی دقت رابطه ارائه شده بین دو پارامتر D_p و D_s ، برای ۵ بافت مختلف جمع‌آوری شده در استان فارس، بعد فرکتالی منحنی دانه‌بندی از روش تایلر و ویت کرافت (Tyler & Wheatcraft, 1992) تخمین زده شد. با محاسبه بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی از رابطه ۱۳، منحنی مشخصه رطوبتی خاک در مکش‌های مختلف پیش‌بینی گردید.

$$D_s = -5.929D_p^3 + 46.336D_p^2 - 119.5D_p + 104.39 \quad (13)$$

به منظور بررسی دقت مدل، از پارامترهای آماری خطای استاندارد نسبی (RSE) و ضریب آکائیک (AIC) استفاده شد که از روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$RSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{O_{ave}} \quad (14)$$

$$AIC = n \ln\left(\frac{ESS}{n}\right) + 2k \quad (15)$$

که در آنها، n = تعداد نقاط منحنی مشخصه رطوبتی؛ O_i = مقادیر اندازه‌گیری شده؛ P_i = مقادیر پیش‌بینی یا اصلاح شده؛ O_{ave} = متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده؛ ESS = مجموع مربعات خطا؛ و k = تعداد پارامترهای مدل است.

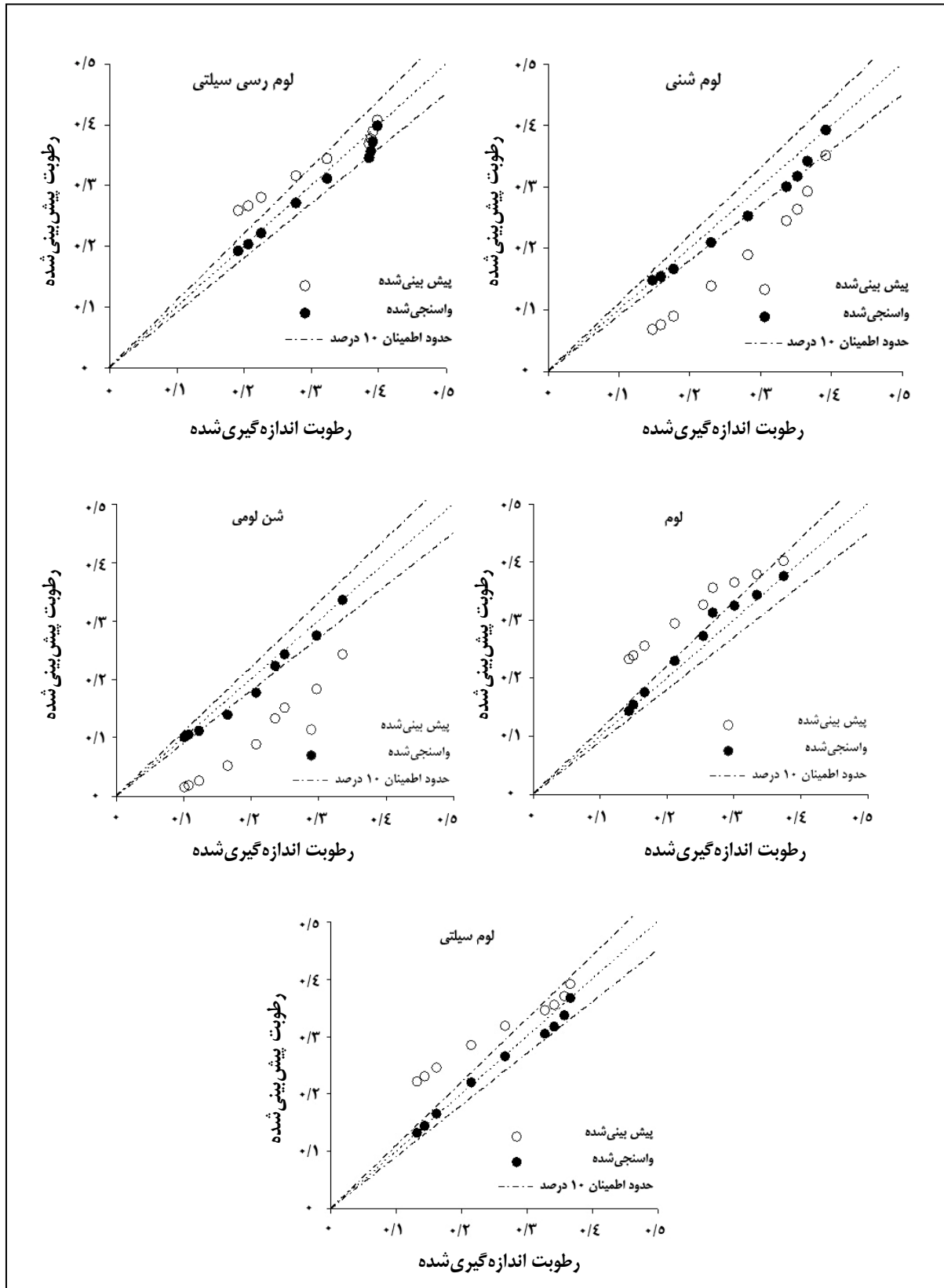
مقایسه مقادیر خطای استاندارد نسبی و ضریب آکائیک برای حالت قبل از واسنجی (جدول ۵) نشان می‌دهد که رابطه ۱۳ منحنی مشخصه رطوبتی خاک را برای خاک‌های با بافت متوسط و سنگین نسبت به خاک‌های با بافت سبک با دقت بیشتری تخمین زده

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

است زیرا مقادیر خطای استاندارد نسبی و ضریب آکائیک حاصل از مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری‌شده برای خاک‌های با بافت متوسط و سنگین کمتر از خاک‌های با بافت سبک است. مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری‌شده برای ۵ بافت مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده برای خاک‌هایی با بافت سنگین و متوسط بیشتر از مقادیر واقعی و برای خاک‌های با بافت سبک، که درصد رس کمتری دارند، کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده است. به نظر می‌رسد استفاده از پارامترهایی نظیر ضریب پلاستیسیته و ظرفیت تبادل کاتیونی که تابعی از نوع و کانی‌های رس است، علاوه بر درصد رس که بیان کمی از مقدار رس موجود در خاک است می‌تواند در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک مفید واقع شود.

جدول ۵- پارامترهای آماری قبل و بعد از واسنجی

بعد از واسنجی		قبل از واسنجی		بافت خاک
<i>AIC</i>	<i>RSE</i>	<i>AIC</i>	<i>RSE</i>	
-۶۵/۱	۰/۰۶	-۵۲/۶	۰/۱۲	لوم رسی سیلتی
-۶۱/۹	۰/۰۸	-۳۸/۸	۰/۳۰	لوم شنی
-۶۷/۵	۰/۰۸	-۳۵/۰	۰/۵۰	شن لومی
-۶۵/۷	۰/۰۷	-۴۰/۸	۰/۳۰	لوم
-۷۱/۶	۰/۰۵	-۴۴/۹	۰/۲۳	لوم سیلتی



شکل ۴- مقایسه مقادیر رطوبت پیش‌بینی و واسنجی شده با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

کلیه نقاط، بین مقادیر اصلاح‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده رطوبتی اختلاف آماری معنی‌داری در سطح اطمینان ۱۰ درصد وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

در مطالعات آب و خاک، منحنی مشخصه رطوبتی خاک از پارامترهای هیدرولیکی ضروری و اندازه‌گیری آن بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. از این رو ضرورت دارد پارامترهای مربوط به مدل فرکتالی همچون بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی و مکش در نقطه ورود هوا برای خاک‌های مختلف از روشی غیر مستقیم و سهل‌الوصول تخمین زده شوند. در این مطالعه، پارامتر مکش در نقطه ورود هوا بر اساس آنچه در بانک اطلاعاتی *UNSODA* به‌صورت متوسط برای بافت‌های مختلف ارائه شده بود در مدل فرکتالی ژو (Xu, 2004) استفاده گردید و بعد فرکتالی منحنی مشخصه رطوبتی (D_s) توسط منحنی تجمعی دانه‌بندی خاک تخمین زده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با دقت قابل قبولی می‌توان منحنی مشخصه رطوبتی خاک را با منحنی تجمعی دانه‌بندی خاک مدل کرد. یادآوری می‌شود که رابطه ۱۴ که برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی ارائه شده، از نمونه خاک‌هایی با درصد رس در محدوده ۵/۱۴ تا ۴۶/۶۱ به‌دست آورده شده است. نمی‌توان انتظار داشت که مشخصه‌ای از خاک را که تابعی از دو پارامتر بافت و ساختمان خاک است به تنهایی توسط پارامتری به‌طور کامل شبیه‌سازی کرد که فقط به بافت خاک بستگی دارد (منحنی دانه‌بندی) و از این رو وجود

واسنجی مدل

در این روش با اندازه‌گیری دو نقطه ابتدایی و انتهایی از منحنی مشخصه رطوبتی در آزمایشگاه (۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال)، مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده اصلاح می‌شوند. به این ترتیب که با ترسیم مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده در مقابل مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری‌شده، مقادیر شیب خط و عرض از مبدا مختصات طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Ghanbarian-Alavijeh, 2007).

$$\theta_p = a\theta_m + b \quad (16)$$

که در آن، a و b = شیب خط و عرض از مبدا مختصات؛ θ_p = مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده؛ و θ_m = مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده‌اند.

سرانجام اینکه مقادیر رطوبتی پیش‌بینی‌شده در کلیه نقاط منحنی مشخصه رطوبتی، با استفاده از رابطه زیر اصلاح می‌شوند:

$$\theta_{adj} = \frac{\theta_p - b}{a} \quad (17)$$

به منظور بررسی دقت واسنجی، پارامترهای آماری RSE و AIC محاسبه شدند (جدول ۵). نتایج آنالیز آماری قبل و بعد از واسنجی حاکی از آن است که مدل واسنجی‌شده قادر است مقادیر خطای استاندارد نسبی را از ۵۰ تا ۸۵ درصد و ضریب آکائیک را از ۲۰ تا ۹۳ درصد کاهش دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد که به جز سه نقطه از

خطا در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک توسط تابعی از بافت خاک است، پارامتری که تابعی از منحنی دانه‌بندی خاک اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. ساختمان خاک نیز باشد (منحنی توزیع خاکدانه‌ها)، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی علاوه بر پارامتری که لحاظ شود.

مراجع

- Abolpour, B. 1998. Determining soil moisture retention curve and hydraulic properties from soil texture. *Iranian J. Agric. Sci.* 29(1): 195-205. (in Farsi)
- Arya, L. M. and Paris, J. F. 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1023-1030.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. Hydrology Paper No. 3.
- Campbell, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117, 311-314.
- de Gennes, P. G. 1985. Partial Filling of a Fractal Structure by a Wetting Fluid. In: Adler. Fritzsche, H. and Ovshinsky, S. R. (Eds.). *Physics of Disordered Materials*. Plenum Press. N. Y.
- Filgueira, R. R., Pachepsky, Ya. A., Fournier, L. L., Sarli, G. O. and Aragon, A. 1999. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling. *Soil Sci.* 164, 217-223.
- Ghanbarian-Alavijeh, B. 2007. Prediction of soil water retention curve using fragment-size distribution. M. Sc. Thesis. Dept. of Water and Soil Eng. University of Tehran. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Ghanbarian-Alavijeh, B. and Liaghat, A. M. 2007. Comparison of two fractal and empirical models in prediction of unsaturated hydraulic conductivity. Proceeding of the 10th Congress of Iranian Soil Science. University of Tehran. (in Farsi)

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

- Ghanbarian-Alavijeh, B. Liaghat, A. M., Shorafa, M. and Moghimi-Araghi, S. 2007. Evaluation of perfect fractal model in estimation of soil water retention curve. *Iranian J. Irrig. Drain.* 1, 7-19. (in Farsi)
- Huang, G. H. and Zhan, W. 2002. Fractal property of soil particle size distribution and its application. *Acta Pedologica Sinica.* 39(4): 490-497.
- Huang, G. H. and Zhang, R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma.* 127, 52-61.
- Hutson, J. L. and Cass, A. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38, 105-113.
- Kravchenko, A. and Zhang, R. D. 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: A fractal approach. *Soil Sci.* 163, 171-179.
- Leij, F. J., Russel, W. B. and Lesch, S. M. 1997. Closed-form expressions for water retention and conductivity data. *Ground Water.* 35, 848-858.
- Liu, J. L. and Xu, S. H. 2003. Figuring soil water characteristic curve based on particle size distribution data: Application of fractal method. *Acta Pedologica Sinica.* 40(1), 46-52.
- Mandelbrot, B. B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature.* Freeman. N. Y.
- Mertens, J., Stenger, R. and Barkle, G. F. 2006. Multi objective inverse modeling for soil parameter estimation and model verification. *Vadose Zone J.* 5, 917-933.
- Minasny, B. and McBratney, A. B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(4): 1105-1110.
- Moench, A. F. 2003. Estimation of hectare-scale soil moisture characteristics from aquifer-test data. *J. Hydrol.* 281(1): 82-95.
- Perfect, E. 1999. Estimating soil mass fractal dimension from water retention curves. *Geoderma.* 88, 221-231.
- Rieu, M. and Sposito, G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1231-1238.

- Russo, D. 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 24, 453-459.
- Schaap, M. G. and Bouten, W. 1996. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. *Water Resour. Res.* 32, 3033-3040.
- Schaap, M. G., Leij, F. J. and van Genuchten, M. Th. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163-176.
- Taghizadeh, A. 2005. Prediction of soil water retention curve and hydraulic conductivity using particle-size distribution. M. Sc. Thesis. Dept. of Water and Soil Eng. University of Tehran. Karaj. Iran. (in Farsi)
- Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 987-996.
- Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resour. Res.* 26, 1047-1054.
- Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. 1992. Fractal scaling of soil particle size-distributions: Analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 362-369.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44, 892-898.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. and Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 148(6): 389-403.
- Wösten, J. H. M. and van Genuchten, M. Th. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1762-1770.
- Wösten, J. H. M., Finke, P. A. and Jansen, M. J. W. 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma.* 66, 227-237.

پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی ...

Wu, Q., Borkovec, M. and Sticher, H. 1993. On particle-size distributions in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 883-890.

Xu, Y. 2004. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution. Computers and Geotechnics. 31, 549-557.



Prediction of Soil Water Retention Curve Using Soil Particle-Size Distribution

B. Ghanbarian-Alavijeh*, A. M. Liaghat, M. Shorafa and S. Moghimi-Araghi

*Corresponding Author: M.Sc. Graduate, P. O. Box: 31587-77871, Karaj, Iran. E-mail: behzad1361@gmail.com

The soil water retention curve (SWRC) is a basic characteristic of the determination of soil hydraulic properties, including unsaturated hydraulic conductivity. Measurement of this curve is essential to research, thus scientists have focused on indirect methods such as pedotransfer functions and empirical relationships to estimate SWRC easily. Since there is a close relationship between SWRC and particle-size distribution (PSD), fractal geometry was used in this study to define a relationship between the fractal dimensions of these two curves. This helps to obtain an SWRC equation based on soil particle size distribution as a readily available parameter. To achieve the above objective, 40 soil samples with seven different textures were used. Two logarithmic equations were presented for determination of the fractal dimensions of PSD and SWRC based on their clay percentages. Their correlation coefficients equaled 0.96 and 0.93, respectively. Finally, a cubic polynomial equation was obtained between the fractal dimension of SWRC (D_s) and the fractal dimension of PSD (D_p) with a goodness of fit of $R^2=0.94$. The physical properties of another five soils collected from Pars province were used to evaluate this relationship. First, the D_p of the soils were calculated. Next, using the D_s - D_p relationship, the D_s and the SWRC equation were estimated using the Xu model. To increase the accuracy of the prediction of SWRC, a calibration model was used to adjust the predicted water content values by using two measured points on the SWRC. Comparison of the adjusted water content values with measured ones was done by statistical analysis and calculating the relative standard error (RSE) and Akaike's information criterion (AIC). The results showed that the RSE and AIC values decreased 50% to 85% and 20% to 93%, respectively, using the calibration model.

Key Words: Fractal Dimension, Particle Size Distribution, Soil Water Retention Curve