

برآورد برخی پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از بعد فرکتالی ذرات جامد خاک

*حجت امامی

دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲

چکیده

سابقه و هدف: منحنی رطوبتی خاک یکی از مهم‌ترین توابع هیدرولیکی در مدل‌سازی جریان آب و انتقال اصلاح در محیط‌های متخلخل است. اگرچه از روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده می‌شود، این روش‌ها، وقت‌گیر، مشکل و هزینه‌بر می‌باشند. در دهه‌های اخیر روابط بین مقدار آب و پتانسیل ماتریک خاک با استفاده از مدل‌های هندسی فرکتالی مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های فرکتالی بر اساس مفاهیم ریاضی و فیزیکی، هندسه ذرات جامد در یک محیط متخلخل را توصیف می‌کنند. هندسه فرکتالی به عنوان یک پل ارتباطی بین مدل‌های تجربی و ماهیت فیزیکی پارامترها، ابزار مفیدی را فراهم کرده است. بر اساس مقیاس فرکتال ساختمان خاک، مدل‌های مختلف منحنی رطوبتی خاک توسعه یافته‌اند. همچنین مدل‌هایی بر اساس مقیاس فرکتال توزیع اندازه ذرات یا منافذ خاک‌ها ارائه شده‌اند. برای به‌کارگیری این مدل‌ها، لازم است ابعاد فرکتالی تعیین شود. این پژوهش با هدف برآورد برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از بعد فرکتالی ذرات جامد خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها: برای برآورد مقادیر رطوبت از مدل فرکتالی فاز جامد- منافذ تعداد ۴۰ نمونه خاک با دامنه گسترده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از ۴۰ کیلومتری جنوب مشهد جمع‌آوری شدند. بافت و جرم ویژه ظاهری خاک، مقادیر رطوبت در نه مکش شامل صفر، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری و از آن‌ها برای تعیین پارامترهای معادله ون‌گنوختن (m و α) در نرم‌افزار RETC استفاده شد. همچنین بعد فرکتالی ذرات جامد خاک بر اساس درصد رس تعیین شد و از آن برای برآورد مقادیر رطوبت معادلات بروکس- کوری و ون‌گنوختن استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مقادیر ضریب همبستگی (r) بین رطوبت اندازه‌گیری شده با مقادیر تخمینی توسط مدل‌های بروکس- کوری و ون‌گنوختن در هر سه خاک لوم سیلتی، لوم و لوم شنی نسبتاً بالا (بیش از ۰/۸۶) بود، ولی دقت مدل‌ها در برآورد رطوبت در کلاس لوم سیلتی بیش‌تر از دو کلاس بافتی دیگر بود. همچنین استفاده از بعد فرکتالی برای تخمین α معادله ون‌گنوختن در هر سه کلاس بافتی خاک از دقت بالایی (r بیش از ۰/۹۹ و $RMSE$ کم‌تر از ۰/۰۲) برخوردار بود. مقادیر تخمینی پارامتر m معادله ون‌گنوختن توسط بعد فرکتالی ذرات خاک در کلاس بافت لوم شنی ($r=0/36$ و $RMSE=0/129$) دارای دقت پایینی بود، اما در کلاس‌های بافتی لوم ($r=0/49$ و $RMSE=0/066$) و به‌ویژه لوم سیلتی ($r=0/88$ و $RMSE=0/065$) دقت آن بالا بود.

* مسئول مکاتبه: hemami@um.ac.ir

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از بعد فرکتالی در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک‌های با بافت متوسط مشابه بافت ریز از دقت بالایی برخوردار است و کارایی آن در خاک‌های درشت بافت پایین است.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، رطوبت خاک، فرکتال

مقدمه

منحنی رطوبتی خاک یکی از مهم‌ترین توابع هیدرولیکی در مدل‌سازی جریان آب و انتقال املاح در محیط‌های متخلخل است. همچنین منحنی رطوبتی خاک برای مطالعه آب قابل استفاده گیاه، نفوذ، زهکشی، هدایت هیدرولیکی، آبیاری، تنش آب در گیاهان و حرکت املاح ضروری است (۴، ۲۴، ۳۰). در دهه‌های اخیر مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال آلاینده‌ها در خاک‌های اشباع و غیراشباع (۹) و منحنی رطوبتی خاک (۴، ۲۴، ۳۰) ارائه شده‌اند. محدودیت اصلی به‌کارگیری این مدل‌ها، کمبود اطلاعات مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (۹) مشکل، هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی (۱۱) است. علاوه بر این، به‌علت تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی در مزرعه، تعداد زیادی نمونه برای تعیین توزیع مکانی مناسب ویژگی‌های هیدرولیکی لازم است (۹). پارامترهای موجود در توابع هیدرولیکی معمولاً از طریق برازش توابع و داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی و نیز روش‌های غیرمستقیم مانند روش معکوس، توابع انتقالی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و ... برآورد می‌گردند.

اخیراً ایجاد روابط بین مقدار آب و پتانسیل ماتریک با استفاده از مدل‌های هندسی فرکتالی مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌های فرکتالی بر اساس مفاهیم ریاضی و فیزیکی، هندسه ذرات جامد در یک

محیط متخلخل را توصیف می‌کنند. موضوع اصلی فرکتال‌ها توصیف دامنه وسیعی از ساختارهای طبیعی نامنظم، قطعات ریز یا درشت و ذراتی با اندازه‌های مختلف است که دارای اشکال هندسی نامنظمی هستند و این ذرات از طریق مقیاس ویژه‌ای با یکدیگر ارتباط دارند (۱۶). ارائه هندسه فرکتالی باعث شناخت بهتر ویژگی‌های مواد و فرآیندهای ظاهراً نامنظم موجود در طبیعت شده است. از این رو می‌توان گفت هندسه فرکتالی به‌عنوان یک پل ارتباطی بین مدل‌های تجربی و ماهیت فیزیکی پارامترها، ابزار مفیدی را فراهم کرده است (۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۸).

سه نوع از مدل‌های منحنی رطوبتی بر اساس ساختار فرکتالی ساختمان خاک پیشنهاد شده‌اند (۹): اساس روش اول فرکتال جرمی است که در آن ابعاد فرکتالی ذرات جامد، سطح و حجم منافذ یکسان در نظر گرفته می‌شود (۱۹). روش دوم بر اساس توزیع فرکتالی سطح منافذ بدون در نظر گرفتن مقیاس جرمی است (۲۶). در روش سوم توزیع فرکتالی اندازه منافذ بدون هیچ‌گونه پیش فرضی در مورد هندسه جرم و سطح مشترک ذرات جامد- منافذ در نظر گرفته می‌شود (۱۸، ۲۱، ۲۸). برای به‌کارگیری این مدل‌ها لازم است ابعاد فرکتالی آن‌ها تعیین شود. ولی به‌علت پیچیدگی اندازه‌گیری توزیع اندازه و حجم منافذ، تخمین ابعاد فرکتالی نسبتاً مشکل است، به‌دست آوردن داده‌های فاز جامد یا توزیع اندازه ذرات راحت‌تر از اندازه و حجم منافذ است. بنابراین

هیدرولیکی بروکس و کوری و بعد فرکتالی فاز جامد- منافذ خاک را برای تخمین پارامترهای مدل وان گنوختن و سپس منحنی رطوبتی خاک استفاده نمودند (۹). آن‌ها پارامترهای مدل وان گنوختن را از بعد فرکتالی پیش‌بینی نمودند ولی روش پیشنهادی قادر به پیش‌بینی پارامتر α در مدل وان گنوختن نبود.

بنابراین برقراری رابطه بین بعد فرکتالی منحنی رطوبتی و بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات مفید خواهد بود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین ابعاد فرکتالی توزیع اندازه- منافذ و توزیع اندازه ذرات تاحدی وابسته با بافت خاک است. براساس اطلاعات موجود، بررسی چندانی بر روی رابطه کمی بین بعد فرکتالی و بافت خاک صورت نگرفته است. بنابراین در این پژوهش با هدف تعیین بعد فرکتالی ذرات خاک با استفاده درصد رس و استفاده از آن برای برآورد برخی از مدل‌های منحنی رطوبتی (ون گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹)، بروکس و کوری (۱۹۶۴) (۴) و ریو و اسپوزیتو (۱۹۹۱a، ۱۱۹۱b) (۲۲، ۲۳) و پارامترهای معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) در برخی از خاک‌های جنوب مشهد انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای برآورد مقادیر رطوبت از مدل فرکتالی فاز جامد- منافذ تعداد ۴۰ نمونه خاک با دامنه گسترده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از ۴۰ کیلومتری جنوب مشهد جمع‌آوری شدند. منطقه مورد مطالعه در اطراف روستای ده‌سرخ، به وسعت ۱۸۰۰ هکتار و در محدوده طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۱ دقیقه و ۵۲/۱۷ ثانیه تا ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه و ۵۱/۵۹ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و صفر دقیقه و ۲۳/۲۳ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه و ۲۷/۲۱ ثانیه

برقراری رابطه بین بعد فرکتالی منحنی رطوبتی و بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات مفید خواهد بود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین ابعاد فرکتالی توزیع اندازه منافذ و توزیع اندازه ذرات تاحدی وابسته با بافت خاک است. به‌طورکلی خاک‌های ریزبافت ابعاد فرکتالی بزرگ‌تری دارند، در حالی که خاک‌های درشت بافت ابعاد فرکتالی کوچک‌تری دارند (۶، ۱۰، ۲۷). براساس اطلاعات موجود، بررسی چندانی بر روی رابطه کمی بین بعد فرکتالی و بافت خاک صورت نگرفته است و تنها هوانگ و ژانگ (۲۰۰۵) مطالعه‌ای را در این زمینه انجام داده‌اند (۱۱).

مدل برد و همکاران (۲۰۰۰) بر اساس توزیع فرکتالی فاز جامد- منافذ برای منحنی رطوبتی ارائه شده است (۱). این مدل روش مستقیمی را برای برآورد بعد فرکتالی منحنی رطوبتی از توزیع اندازه ذرات فراهم می‌کند. با این وجود داده‌های کمی برای ارزیابی این مدل استفاده شده‌اند (۱) و لازم است داده‌های بیش‌تری به‌ویژه در خاک‌های آهکی مثل مناطق ایران بررسی گردند. ژو و سان (۲۰۰۲) منافذ خاک را از طریق هندسه فرکتالی توصیف نمودند و بعد فرکتالی را براساس اندازه‌گیری‌های تخلخل خاک به‌دست آوردند (۳۰). سپس همبستگی تابع نفوذ آب به خاک را با توزیع اندازه منافذ خاک‌های غیراشباع را مورد بررسی قرار دادند و تابع نفوذ آب به خاک را از مدل فرکتالی توزیع اندازه منافذ استخراج نمودند. آن‌ها عنوان کردند که ویژگی‌های آب خاک را می‌توان با استفاده از بعد فرکتالی کمی نمود.

قنبریان علویجه و همکاران (۲۰۱۰) روش پیشنهادی لنهاارد و همکاران (۱۹۸۹) (۱۴) را بر اساس رابطه بین مدل‌های ون گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) و بروکس و کوری (۱۹۶۴) (۴) و رابطه بین پارامترهای

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

که در آن، θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت در هر مکش، رطوبت اشباع و باقی مانده ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، مقدار مکش h (kPa)، α تقریباً معادل عکس مکش در نقطه ورود هوا (kPa^{-1}) و $m = (1 - 1/n)$ پارامترهای تجربی هستند.

با فرض $\theta_r = 0$ ، مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) عبارت است از (۴):

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_{\min}} \right)^{-\lambda} \quad (4)$$

که در آن، λ شاخص توزیع اندازه منافذ است و h_{\min} مکش در نقطه ورود هوا (kPa) است.

همچنین برای تخمین مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف از رابطه پیشنهادی برد و همکاران (۲۰۰۰) استفاده شد، که آن‌ها با استفاده از فرکتال فاز جامد-منافذ، یک مدل عمومی را برای منحنی رطوبتی به شکل زیر ارائه نمودند (۱):

$$\theta = \phi - \frac{p}{p+s} \left[1 - \left(\frac{\psi}{\psi_{\min}} \right)^{D-3} \right] \quad (5)$$

$$\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$$

که در آن، Φ تخلخل و ψ_{\min} و ψ_{\max} مکش‌هایی هستند که در مدل فرکتالی فاز جامد-منافذ، م‌قادیر بیش از آن‌ها به ترتیب سبب خروج آب از کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین منافذ می‌شوند، p و s به ترتیب اجزای جامد و منافذ بر اساس توزیع فرکتالی فاز جامد-منافذ هستند.

شمالی قرار دارد. برای تعیین بافت خاک (درصد ذرات شن، سیلت و رس) از روش هیدرومتری با قرائت چهار زمانه (۸) و جرم مخصوص ظاهری از روش سیلندر (۳) استفاده شد. همچنین مقادیر رطوبت در نه مکش شامل صفر، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ (در نمونه‌های دست‌نخورده)، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ (در نمونه‌های دست‌خورده) کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد.

بعد فرکتالی ذرات جامد خاک (D) با استفاده از معادله پیشنهادی هوانگ و ژانگ (۲۰۰۵) محاسبه شد (۱۱، رابطه ۱) و از آن برای پیش‌بینی رطوبت خاک در مکش‌های مختلف و معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) استفاده شد (۲۹).

$$D = a_0 + \frac{1 - e^{a_1 C}}{a_2(1 + e^{a_1 C}) + a_3(1 - e^{a_1 C})} \quad (1)$$

که در آن، C درصد رس و a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 پارامترهای برازش هستند که به ترتیب برابر با ۲/۰۵، ۰/۰۰۴۳۹، ۰/۰۱۱۸- و ۱/۱۰ در نظر گرفته شدند (۱۱).

با برازش داده‌های منحنی رطوبتی بر معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) امکان پیش‌بینی پارامترهای آن با استفاده از بعد فرکتالی ذرات خاک (۲۹) مورد بررسی قرار گرفت. معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) عبارت است از (۲۹):

$$S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (2)$$

که در آن، Se درجه اشباع مؤثر است و از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

که در آن، E بعد اقلیدسی و برای سیستم‌های دو و سه‌بعدی به ترتیب برابر با ۲ و ۳ است و D بعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک است. رابطه ۸ مشابه معادله بروکس و کوری (رابطه ۴) است و پارامتر λ را می‌توان با استفاده از بعد فرکتالی توصیف نمود (۱۲).

لنهارد و همکاران (۱۹۸۹) رابطه بین شاخص توزیع اندازه منافذ (λ) مدل بروکس و کوری و پارامتر m مدل ون‌گنوختن زیر را به صورت زیر ارائه نمودند (۱۴):

$$\lambda = \frac{m}{1-m} (1 - S_e^{1/m}) \quad (9)$$

با مساوی قرار دادن $S_e = 0.5$ ، رابطه ۹ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\lambda = \frac{m}{1-m} (1 - 0.5^{1/m}) \quad (10)$$

با مقایسه رابطه‌های ۴ و ۸ و در نظر گرفتن بعد اقلیدسی برابر با سه، می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\lambda = 3 - D \quad (11)$$

با جایگزینی رابطه ۱۱ در رابطه ۱۰ خواهیم داشت:

$$D = 3 - \frac{m}{1-m} (1 - 0.5^{1/m}) \quad (12)$$

بر اساس رابطه ۱۲ مقدار m از بعد فرکتالی منحنی رطوبتی تخمین زده می‌شود. راه دیگر تخمین m از بعد فرکتالی D، استفاده از فرض ون‌گنوختن (۳۰) است. اگر $m = 1 - 1/n$ باشد:

$$\lambda = n - 1 \quad (13)$$

هنگامی که در رابطه ۵، s به سمت صفر میل کند، فرکتال فاز جامد- منافذ به شکل ساختار فرکتالی فاز جامد در آمده و رابط ۵ به شکل زیر در می‌آید (۲۲، ۲۳):

$$\theta = \phi - 1 + \left(\frac{\psi}{\psi_{\min}} \right)^{D-3} \quad (6)$$

$$\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$$

اگر مقادیر p و s در رابطه ۵، اعدادی غیر از صفر باشد و با فرض این که مدل فرکتال فاز جامد- منافذ در یک مقیاس کوچک اختیاری معتبر باشد، رابطه ۵ به صورت زیر در می‌آید:

$$\theta = \phi \left(\frac{\psi}{\psi_{\min}} \right)^{D-3} \quad \psi_{\min} \leq \psi \quad (7)$$

رابطه ۷ شبیه به معادله کمبل (۱۹۷۴)، تیلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) و بروکس و کوری (۱۹۶۴) است (۵، ۲۸). با این وجود مفهوم فیزیکی بعد فرکتالی D در رابطه ۷ با بعد فرکتالی مدل تیلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) متفاوت است (۲۸) و همچنین با پارامترهای تجربی مدل‌های بروکس و کوری (۱۹۶۴) و کمبل (۱۹۷۴) متفاوت است (۴، ۵). تیلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) فرض کردند که توزیع فرکتالی اندازه منافذ مشابه با فرس سیرپینسکی می‌باشد و بر این اساس مدل منحنی رطوبتی خاک را بر اساس مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) (۴) به صورت زیر پیشنهاد نمودند (۲۸):

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_{\min}} \right)^{D-E} \quad (8)$$

$$MA = \frac{\sum_{i=1}^j (P_i - M_i)}{j} \quad (17)$$

در رابطه‌های بالا P_i و M_i به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده و j نیز بیانگر تعداد مشاهدات می‌باشند.

نتایج و بحث

بعد فرکتالی توزیع اندازه ذرات: نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که به‌طور کلی کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه متوسط بود، به‌طوری‌که ۱۱ نمونه خاک دارای بافت لوم سیلتی، ۱۶ نمونه دارای بافت لوم و ۱۳ نمونه نیز دارای بافت لوم شنی بودند. همچنین مقدار متوسط بعد فرکتالی ذرات جامد خاک برای سه کلاس بافتی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده است با افزایش مقدار رس، مقدار بعد فرکتالی ذرات جامد خاک افزایش یافته است. بیش‌ترین مقدار متوسط رس در کلاس بافتی لوم سیلتی مشاهده شد که به‌طور مشابه بیش‌ترین مقدار متوسط بعد فرکتالی ذرات جامد خاک (۲/۷۶) در این کلاس بافتی به‌دست آمد. همچنین کم‌ترین مقدار متوسط رس و بعد فرکتالی نیز در کلاس بافتی لوم شنی که دارای بیش‌ترین مقدار متوسط شن بود، مشاهده شد. مشخص شده است که بعد فرکتالی ذرات جامد خاک همبستگی بسیار بالایی با بافت خاک دارد و پژوهشگران مختلف نیز عنوان کرده‌اند که با افزایش مقدار رس و کاهش مقدار شن، بعد فرکتالی ذرات جامد خاک افزایش می‌یابد (۲، ۱۱، ۲۷).

که با معادل در نظر گرفتن مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و بروکس و کوری (۱۹۶۴) در مقادیر h با $1 \gg (\alpha h)$ در رابطه ۲ به‌دست می‌آید (۴، ۲۹) و بنابراین $\lambda = mn$. رابطه ۱۳ توسط ما و همکاران (۱۹۹۹) نیز به‌کار گرفته شد (۱۵). با جایگزینی رابطه ۱۳ در رابطه ۱۱ و استفاده از $m = 1 - 1/n$ خواهیم داشت:

$$m = \frac{3 - D}{4 - D} \quad (14)$$

در این پژوهش مقدار m با استفاده از رابطه ۱۴ تخمین زده شد و بر اساس فرض $m = 1 - 1/n$ مقدار n محاسبه شد.

همچنین بر اساس رابطه تجربی تینجوم و همکاران (۱۹۹۷) که رابطه زیر را بین پارامترهای α و h_{min} (kPa^{-1}) ارائه نمودند (۲۵)، مقدار پارامتر α تعیین شد:

$$\alpha = 0.078(h_{min})^{-1.26} \quad (15)$$

به‌منظور ارزیابی رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ در تخمین پارامترهای m و α و همچنین رابطه‌های ۲، ۶ و ۷ در تخمین رطوبت خاک از آماره‌های ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (MA) به‌شرح زیر استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (P_i - M_i)^2}{j}} \quad (16)$$

جدول ۱- میانگین برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه (مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف معیار می‌باشند).

Table 1. The average of some soil physical properties in studied soils.

تخلخل Porosity (cm^3/cm^3)	بعد فرکتالی Fractal Dimension	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gcm^{-3})	رس Clay	سیلت Silt (%)	شن Sand	تعداد Number	کلاس بافتی Textural Class
0.48 (0.05)	2.75 (0.04)	1.37 (0.14)	16.56 (3.57)	40.00 (5.32)	43.44 (6.18)	16	لوم Loam
0.49 (0.05)	2.76 (0.02)	1.34 (0.15)	17.32 (2.09)	55.83 (5.03)	26.85 (5.79)	11	لوم سیلتی Silt Loam
0.46 (0.04)	2.69 (0.05)	1.44 (0.10)	11.82 (2.95)	28.04 (6.22)	60.14 (6.34)	13	لوم شنی Sandy Loam
0.48 (0.05)	2.73 (0.05)	1.38 (0.13)	15.23 (3.81)	40.47 (12.14)	44.30 (14.35)	40	کل Total

رطوبت در مکش‌های مختلف نیز در این کلاس بافتی با دقت بالاتری تخمین زده شده‌اند و با افزایش میانگین درصد شن و کاهش درصد رس در کلاس‌های بافتی لوم و لوم شنی، مقادیر بعد فرکتالی و در نتیجه مقادیر رطوبت با دقت کم‌تری تخمین زده شده‌اند، زیرا همان‌طور که گفته شد میانگین درصد رس در کلاس‌های بافتی لوم سیلتی (۱۷/۳۲) و لوم (۱۶/۵۶) بیش‌تر از کلاس لوم شنی (۱۱/۸۲٪) و میانگین درصد شن نیز در کلاس لوم سیلتی (۲۶/۸۵) بسیار کم‌تر از کلاس‌های لوم (۴۳/۴۴) و لوم شنی (۶۰/۱۴) بود (جدول ۱).

اگرچه مقادیر ضریب همبستگی و RMSE معیارهای مناسبی برای ارزیابی مدل‌های تخمینی می‌باشند، ولی بررسی پراکنش نقاط اندازه‌گیری شده و تخمینی در اطراف خط ۱:۱ می‌تواند اطلاعات بیش‌تری درباره دقت مدل ارائه نماید. پراکنش نقاط اندازه‌گیری شده و تخمینی برای هر سه کلاس بافتی نشان داد که معادله بروکس و کوری (رابطه ۷) (شکل‌های a-۱، a-۲، a-۳) توانسته است مقادیر رطوبت را در مکش‌های مختلف با دقت نسبتاً خوبی برآورد نماید و در هر سه کلاس بافتی نقاط نزدیک

نتایج حاصل از برازش رابطه‌های ۶ و ۷ با داده‌های منحنی رطوبتی در مکش‌های مختلف برای هر سه کلاس بافتی مورد مطالعه و مجموع داده‌ها در جدول ۲ و شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که در مجموع در هر سه نوع خاک مقادیر ضریب همبستگی بین رطوبت اندازه‌گیری شده با مقادیر تخمینی توسط معادله بروکس و کوری (رابطه ۷) در سه خاک لوم سیلتی، لوم و لوم شنی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۸ و ۰/۸۶ بود، در حالی که این ضرایب برای معادله ریو و اسپوزیتو (رابطه ۶) به‌ترتیب برابر با ۰/۵۳، ۰/۵۳ و ۰/۳۰ بود. همچنین دامنه RMSE حاصل از رابطه ۷ بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۱ بود، ولی این مقادیر برای رابطه ۶ برابر با cm^3/cm^3 ۰/۲۵ بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید که دقت رابطه ۶ در تخمین منحنی رطوبتی بسیار کم‌تر از رابطه ۷ بود. از آن‌جا که با افزایش مقدار رس و کاهش مقدار شن، بعد فرکتالی ذرات جامد خاک افزایش می‌یابد (۲، ۱۱، ۲۷) و مشخص شده است که بعد فرکتالی با میزان رس همبستگی مثبتی دارد (۷). بنابراین به‌نظر می‌رسد به‌علت تعیین دقیق‌تر بعد فرکتالی در کلاس بافتی لوم سیلتی مقادیر

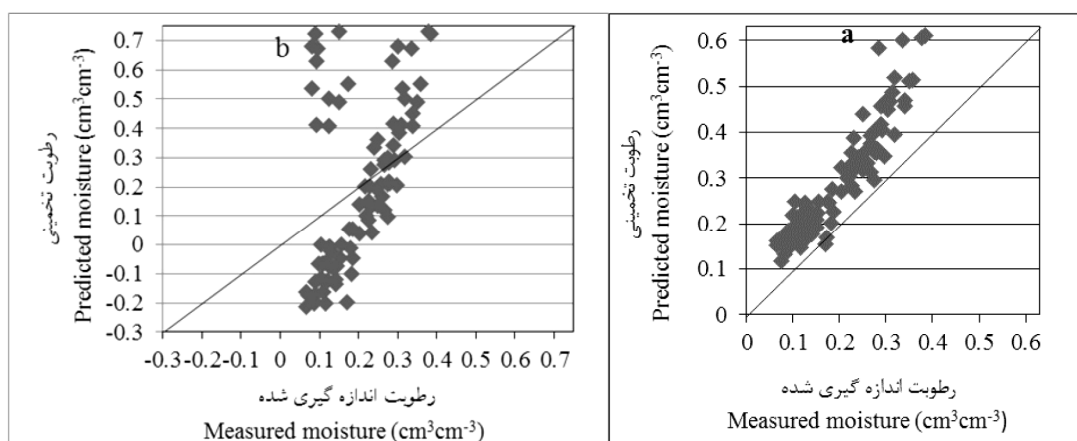
هر سه کلاس بافتی مقادیر رطوبت منفی به دست آمد، که نشان دهنده نامناسب بودن معادله ریو و اسپوزیتو (۱۹۹۱a، ۱۹۹۱b) در برآورد رطوبت می باشد (۲۲، ۲۳). علت دقت بسیار کم معادله ریو اسپوزیتو در برآورد رطوبت این است که در اشتقاق این معادله مقادیر S برابر صفر فرض شده است که این فرض صحیح نیست (۱۷) و به همین علت در معادله بروکس و کوری (۱۹۶۴) مقادیر رطوبت با دقت خوبی تخمین زده شده اند (۴)، در حالی که امکان استفاده عملی از معادله ریو و اسپوزیتو (۱۹۹۱a، ۱۹۹۱b) در برآورد رطوبت وجود ندارد (۲۲، ۲۳).

خط ۱:۱ قرار داشته و از پراکنش کمتری برخوردار بودند. همچنین در هر سه کلاس بافتی نقاط بالای خط ۱:۱ قرار داشتند، که نشان دهنده بیش برآوردی بودن مقادیر رطوبت تخمینی توسط معادله بروکس و کوری می باشد. مقادیر رطوبت تخمینی به دست آمده از معادله ریو و اسپوزیتو (رابطه ۶) (شکل های ۱-۱b، ۲-۲b و ۳-۳b) پراکنش بسیار بالایی در اطراف خط ۱:۱ برخوردار بودند و در مکش های بالا حالت بیش برآوردی و در مکش های کم حالت کم برآوردی داشتند. در مجموع این معادله دقت بسیار پایینی در برآورد رطوبت داشت و حتی در مکش های بالا و در

جدول ۲- نتایج تخمین مقادیر رطوبت در مکش های مختلف خاک های مورد مطالعه.

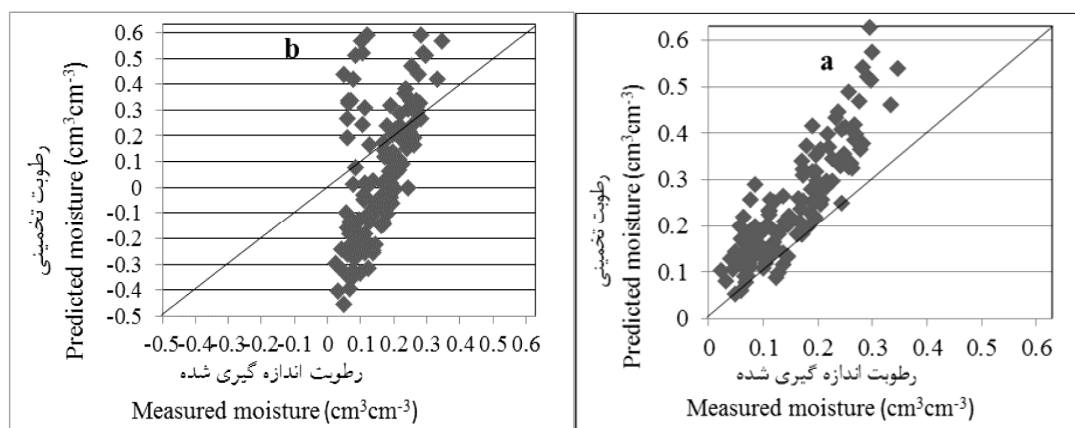
Table 2. The results of predicted moisture contents at different pressure heads in studied soils.

معادله ون گنوختن		معادله ریو و اسپوزیتو		معادله بروکس و کوری		تعداد نمونه Number	کلاس بافتی Textural Class
RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r		
0.06	0.97	0.25	0.53	0.11	0.93	11	لوم سیلتی Silt Loam
0.10	0.86	0.25	0.53	0.10	0.88	16	لوم Loam
0.12	0.92	0.25	0.3	0.09	0.86	13	لوم شنی Sandy Loam



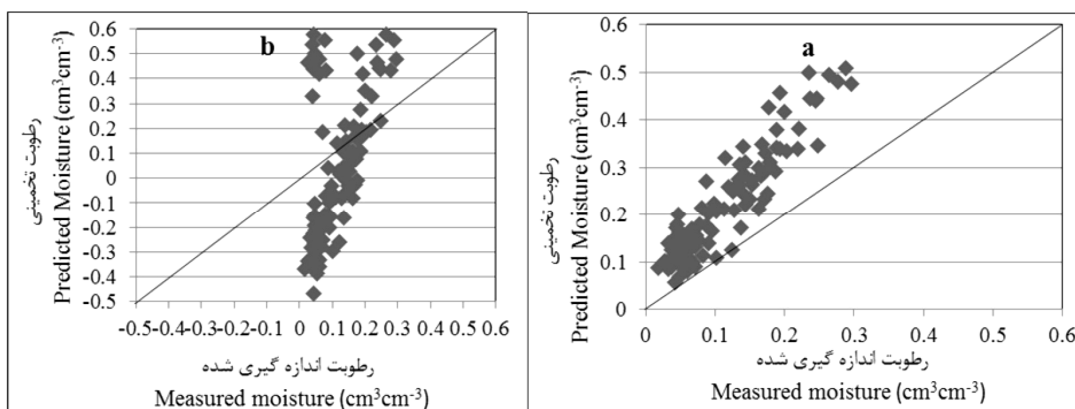
شکل ۱- نتایج تخمین رطوبت در کلاس بافتی لوم سیلتی با استفاده از معادلات بروکس و کوری (a) و ریو و اسپوزیتو (b) در مکش های مختلف.

Figure 1. The results of predicted moisture contents using Brooks and Corey (a), Rieu and Sposito (b) at different pressure heads in silt loam textural class.



شکل ۲- نتایج تخمین رطوبت در کلاس بافتی لوم با استفاده از معادلات بروکس و کوری (a) و ریسو اسپوزیتو (b) در مکش‌های مختلف.

Figure 2. The results of predicted moisture contents using Brooks and Corey (a), Rieu and Sposito (b) at different pressure heads in loam textural class.



شکل ۳- نتایج تخمین رطوبت در کلاس بافتی لوم شنی با استفاده از معادلات بروکس و کوری (a) و ریسو اسپوزیتو (b) در مکش‌های مختلف.

Figure 3. The results of predicted moisture contents using Brooks and Corey (a), Rieu and Sposito (b) at different pressure heads in sandy loam textural class.

در کلاس لوم سیلتی بیش‌ترین و در کلاس بافتی لوم شنی کم‌ترین مقدار بود. همچنین مقادیر RMSE و MR نیز دارای روند مشابهی بود (جدول ۳). بر اساس پارامترهای r ، RMSE و MR رابطه ۱۴ کارایی ضعیفی در برآورد پارامتر m معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) در کلاس‌های بافتی لوم و به‌ویژه لوم شنی دارد، ولی در کلاس بافتی لوم سیلتی که بافت آن در مقایسه با دو کلاس قبلی ریزتر است، دقت و کارایی خوبی دارد. قنبریان علویچه و همکاران

علاوه‌بر این نتایج نشان داد که استفاده از بعد فرکتالی برای تخمین پارامترهای m و α (رابطه‌های ۱۴ و ۱۵) معادله ون‌گنوختن (رابطه ۲) در هر سه کلاس بافتی خاک از دقت بالایی برخوردار بود و حتی دقت این معادله در تخمین رطوبت خاک‌های مورد مطالعه در کلاس بافتی لوم سیلتی بیش‌تر از دو کلاس لوم و لوم شنی بود. مقادیر تخمینی پارامتر m بر اساس رابطه ۱۴ نشان داد که ضریب همبستگی بین مقدار m تخمینی و به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC

کمترین مقادیر RMSE و قدرمطلق MR در کلاس بافتی لوم سیلتی و بیشترین مقادیر RMSE و قدرمطلق MR در کلاس بافتی لوم مشاهده شد (جدول ۳). مقادیر بالای RMSE و قدرمطلق MR در دو کلاس بافتی لوم شنی و به‌ویژه کلاس بافتی لوم بیانگر نامناسب بودن رابطه ۱۵ در برآورد پارامتر α در خاک‌های با بافت متوسط تا درشت می‌باشد، ولی در کلاس‌های بافتی ریز می‌توان از این معادله در برآورد پارامتر α استفاده نمود. دلیل آن برآورد دقیق‌تر بعد فرکتالی ذرات خاک در کلاس بافت ریز می‌باشد که قبلاً به آن اشاره شد. قنبریان علویجه و همکاران (۲۰۱۰) نیز مقادیر تخمینی پارامتر α به کمک رابطه ۱۵ را با مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC مقایسه نموده و عنوان کردند که به کمک رابطه ۱۵ می‌توان تخمین قابل‌قبولی از پارامتر α را به‌دست آورد (۹). قنبریان علویجه و همکاران (۲۰۱۰) برای پارامتر α ، مقدار RMSE را ۰/۳۳۷ و مقدار MR را برابر با ۰/۲۰۲ گزارش نمودند (۹)، که در مقایسه با نتایج این پژوهش (جدول ۳) مشخص شد در هر سه کلاس بافتی مقادیر RMSE (۰/۲۰۲ تا ۰/۰۰۹۵) و قدرمطلق مقادیر MR (۰/۰۱۶۶ تا ۰/۰۰۸۴) بسیار کمتر از مقادیر به‌دست آمده توسط قنبریان علویجه و همکاران (۲۰۱۰) است (۹).

(۲۰۱۰) از ۷۵ نمونه از داده‌های UNSODA (۱۳) برای ارزیابی رابطه بین بعد فرکتالی و پارامترهای هیدرولیکی خاک به‌ویژه m استفاده کردند (۹). آن‌ها با مقایسه مقادیر m به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC و مقادیر m تخمینی از رابطه‌های ۱۲ و ۱۴ دریافتند که مقدار m تخمینی توسط هر دو رابطه مذکور کمتر از مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC بود و مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱۲ اندکی بهتر از رابطه ۱۴ بود. دامنه مقادیر RMSE به‌دست آمده در پژوهش حاضر برای سه کلاس بافتی مورد مطالعه ۰/۰۶۵ تا ۰/۱۲۹ بود (جدول ۳) که کمتر از مقادیر به‌دست آمده از مطالعه قنبریان علویجه و همکاران (۲۰۱۰) بر اساس رابطه‌های ۱۲ و ۱۴ بود (۹)، که به‌ترتیب ۰/۱۷۶ و ۰/۱۸۳ بود. همچنین مقادیر MR هم در این پژوهش (۰/۱۱۰ تا ۰/۰۵۱-) کمتر از مقادیر به‌دست آمده توسط قنبریان و همکاران (۲۰۱۰) (۰/۱۲۰ تا ۰/۱۲۵-) بود (۹). ما و همکاران (۱۹۹۹) نیز گزارش نموده‌اند (۱۵) که استفاده از رابطه‌های ۱۲ و ۱۴ سبب کم‌برآوردی پارامتر m معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) می‌شود (۲۹).

ضریب همبستگی بین مقادیر تخمینی α از معادله ۱۵ و مقادیر به‌دست آمده از نرم‌افزار RETC در هر سه کلاس بافتی بسیار بالا بود، ولی مقادیر RMSE و MR در سه کلاس بافتی متفاوت بود، به‌طوری‌که

جدول ۳- نتایج پارامترهای m و α معادله ون‌گنوختن در خاک‌های مورد مطالعه.

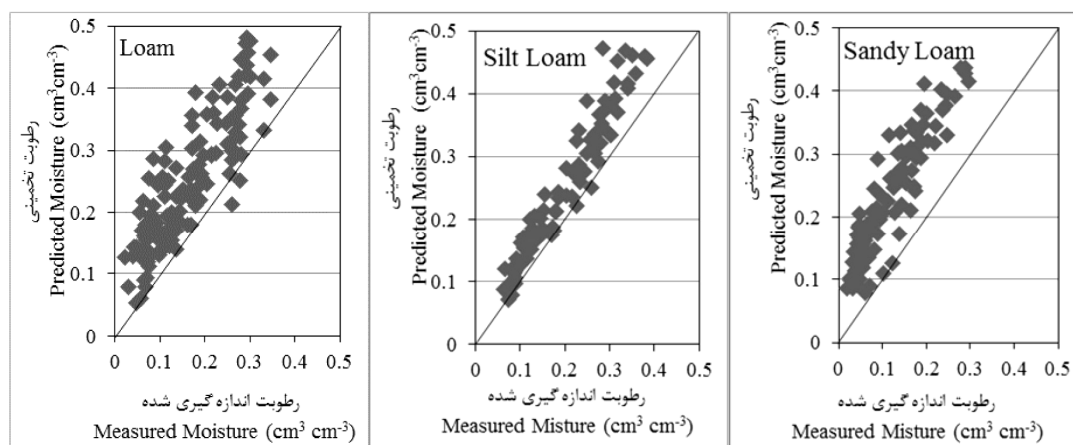
Table 3. The results of α and m parameters of Van Genuchten equation in studied soils.

پارامتر α			پارامتر m			تعداد نمونه Number	کلاس بافتی Textural Class
MR	RMSE	r	MR	RMSE	r		
-0.0084	0.0095	0.999	-0.051	0.065	0.88	11	لوم سیلتی Silt Loam
-0.0166	0.202	0.997	-0.057	0.066	0.49	16	لوم Loam
-0.0111	0.0128	0.998	-0.110	0.129	0.36	13	لوم شنی Sandy Loam

مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف را برآورد نمود. از آنجا که بر اساس رابطه‌های ۹ و ۱۰ و فرض $m=1-1/n$ پارامتر λ در مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) با پارامتر m در مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) در ارتباط است (۴، ۲۹)، به همین علت هر دو مدل با دقت خوبی توانسته‌اند مقادیر رطوبت را در مکش‌های مختلف را برآورد نمایند.

پراکنش نقاط اندازه‌گیری شده و تخمینی با مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) در شکل ۴ نشان می‌دهد (۲۹) که در کلاس بافتی لوم سیلتی نقاط اندازه‌گیری شده و تخمینی تقریباً بر روی خط ۱:۱ قرار دارند و از پراکندگی بسیار کمی برخوردارند. در کلاس بافتی لوم شنی نیز پراکنش نقاط از کلاس بافتی لوم کم‌تری از کلاس بافتی لوم سیلتی بیش‌تر است. همچنین در کلاس لوم با این‌که نقاط بیش‌تری نزدیک خط ۱:۱ قرار دارند، ولی پراکندگی نقاط نسبت به دو کلاس بافتی دیگر بیش‌تر است. در مجموع پراکنش نقاط در هر سه کلاس بافتی به‌گونه‌ای است که همه نقاط بالای خط ۱:۱ واقع شده‌اند و از این‌رو، رطوبت به‌دست آمده با این مدل نیز در همه مکش‌ها بیش‌برآوردی می‌باشد.

بعد از تعیین پارامترهای معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) با بهره‌گیری از بعد فرکتالی ذرات جامد خاک، مقادیر رطوبت با استفاده از این مدل تخمین زده شد (۲۹). نتایج نشان داد که در کلاس بافتی لوم شنی ضریب همبستگی بین رطوبت اندازه‌گیری شده و تخمینی مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) بیش‌تر از مدل بروکس و کوری (۴، رابطه ۷) بود، اما مقدار RMSE حاصل از مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) اندکی بیش از مدل بروکس و کوری (۴، رابطه ۷) بود. در خاک لومی مقدار RMSE هر دو مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) و بروکس و کوری (۴) (۱۹۶۴) یکسان بود (۰/۱۰) اما ضریب همبستگی حاصل از مدل بروکس و کوری (۴) (۱۹۶۴) اندکی بیش‌تر از مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) (۲۹) بود، البته تفاوت این دو مدل در دو کلاس بافتی لوم و لوم شنی ناچیز بود (جدول ۲). بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت بر اساس بعد فرکتالی به‌دست آمده از درصد رس، می‌توان پارامترهای شکل منحنی رطوبتی مدل ون‌گنوختن (α و m) و همچنین پارامتر توزیع اندازه ذرات مدل بروکس و کوری (λ) را با دقت قابل‌قبولی تعیین نمود و بر اساس مدل‌های مذکور



شکل ۴- نتایج تخمین رطوبت در خاک‌های مور مطالعه با استفاده از مدل ون‌گنوختن در مکش‌های مختلف.

Figure 4. The results of predicted moisture contents using Van Genuchten model at different pressure heads in studied soils.

نتیجه گیری

تخمین پارامترهای هیدرولیکی و از جمله پارامترهای m و α استفاده نمود. به طور مشابه با تخمین پارامترهای m و α بر اساس بعد فرکتالی ذرات جامد خاک، می توان مقادیر رطوبت در مکش های مختلف را با دقت خوبی به ویژه در خاک های ریزبافت به کمک معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) به دست آورد (۲۹)، هر چند با استفاده از بعد فرکتالی امکان برآورد مقادیر رطوبت توسط معادله بروکس و کوری (۱۹۶۴) با دقت قابل قبول نیز وجود دارد (۴).

به طور کلی نتایج هر دو رابطه های ۱۴ و ۱۵ در برآورد پارامترهای m و α بیانگر اعتبار معادلات بالا در خاک های ریزبافت تا نسبتاً متوسط است و کارایی آن ها در خاک های متوسط و درشت بافت بسیار پایین است. به نظر می رسد تفکیک داده های موجود در سه کلاس بافتی سبب بهبود تخمین پارامترهای m و α در این پژوهش گشته است، زیرا همان طور که گفته شد در کلاس های ریزبافت می توان بعد فرکتالی ذرات خاک را می توان با دقت بالایی تعیین نمود و از آن در

منابع

1. Bird, N.R.A., Perrier, E., and Rieu, M. 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distribution. *Eur. J. Soil Sci.* 51: 55-63.
2. Bittelli, M., Campbell, G.S., and Flury, M. 1999. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 782-788.
3. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density, P 363-382. In: A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part1-Physical and mineralogical methods. Second edition.* Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin. USA.
4. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers.*, vol. 3. Colorado State University, USA, 24p.
5. Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117: 311-314.
6. Comegna, V., Damiani, P., and Sommella, A. 1998. Use of a fractal model for determining soil water retention curves. *Geoderma.* 85: 307-323.
7. Filgueira, R.R., Fournier, L.L., Cerisola, C.I., Gelati, P., and Garcia, M.G. 2006. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. *Geoderma.* 134: 327-334.
8. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, P 383-411. In: A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part1-Physical and mineralogical methods. Second edition.* Publisher Madison, Wisconsin. USA.
9. Ghanbarian-Alvijeh, B., Liaghat, A., Guan-Hua, H., and Van Genuchten, M.Th. 2010. Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. *Pedosphere.* 20: 4. 456-465.
10. Huang, G., and Zhan, W. 2002. Modeling the soil water retention curve with fractal theory. *Adv. Water Sci.* 13: 55-60. (In Chinese)
11. Huang, G., and Zhang, R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma.* 127: 52-61.
12. Huang, G., Zhang, R., and Huang, Q. 2006. Modeling soil water retention curve with a fractal method. *Pedosphere.* 16: 137-146.
13. Leij, F.J., Alves, W.J., van Genuchten, M.Th., and Williams, J.R. 1996. *Unsaturated Soil Hydraulic Database, UNSODA 1.0 User's Manual.* EPA Report 600/R96/095. US Environmental Protection Agency, Ada, OK 103p.
14. Lenhard, R.J., Parker, J.C., and Mishra, S. 1989. On the correspondence between Brooks-Corey and van Genuchten models. *J. Irrig. Drain. E.* 115: 744-751.

15. Ma, Q.L., Hook, J.E., and Ahuja, L.R. 1999. Influence of three-parameter conversion methods between van Genuchten and Brooks-Corey functions on soil hydraulic properties and water-balance predictions. *Water Resour. Res.* 35: 2571-2578.
16. Mandelbrot, B.B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, San Francisco, USA, 460p.
17. Pachepsky, Y.A., Radcliff, D.E., and Maghdi Selim, H. 2003. *Scaling methods in soil physics*. CRC Press. New York, USA, 417p.
18. Pachepsky, Y.A., Shcherbakov, R.A., and Korsunskaya, L. 1995. Scaling of soil water retention using a fractal model. *Soil Sci.* 159: 99-104.
19. Perfect, E. 1999. Estimating soil mass fractal dimensions from water retention curves. *Geoderma*. 88: 221-231.
20. Perfect, E., McLaughlin, N.B., Kay, B.D., and Topp, G.C. 1998. Reply to the comment on an improved fractal equation for the soil water retention curve Q . *Water Resour. Res.* 34: 933-935.
21. Perrier, E., Rieu, M., Sposito, G., and de Marsily, G. 1996. Models of water retention curve for soils with fractal pore size distribution. *Water Resour. Res.* 32: 3025-3031.
22. Rieu, M., and Sposito, G. 1991a. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 231-1238.
23. Rieu, M., and Sposito, G. 1991b. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1239-1244.
24. 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.
25. Tinjum, J.M., Benson, C.H., and Blotz, L.R. 1997. Soil-water characteristic curves for compacted clays. *J. Geotech. Geoenviron.* 123: 1060-1069.
26. Toledo, P.G., Novy, R.A., Davis, H., and Scriven, L.E. 1990. Hydraulic conductivity of porous media at low water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 673-679.
27. 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.
28. Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1990. Fractal processes in soil water relation. *Water Resour. Res.* 26: 1047-1054.
29. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
30. Xu, Y.F., and Sun, D.A. 2002. A fractal model for soil pores and its application to determination of water permeability. *Physica A*. 316: 56-64.



Estimating some hydraulic characteristics of soil using fractal dimension of solid particles

***H. Emami**

Associate Prof., Dept of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 02/17/2015; Accepted: 06/23/2015

Abstract

Background and Objectives: Soil moisture retention curve is the most important hydraulic function for modeling water flow and solute transport in porous media. Although the hydraulic properties are measured through the direct methods, they are time consuming, difficult and expensive. In last decades, considerable attention has been focused on the development of relationships between the soil water content and the matric potential using fractal geometry models. Fractal models based on mathematical and physical concepts described the geometry of solid porous media. Applications of fractal geometry has provided a useful tool to bridge the gap between the use of empirical models and physical interpretation of their parameters. Based on the fractal scaling of soil structure, different soil moisture retention curve models have been developed. There are also models based on the fractal scaling of particle size distribution or the pore phase of soils. To apply the models, one needs to determine the fractal dimensions. This research was performed to estimate soil hydraulic characteristics using fractal dimension of solid particles in 40 soil samples.

Materials and Methods: 40 soil samples with various physical and chemical properties were collected from 40 km of southern Mashhad (Iran) to estimate soil hydraulic characteristics using fractal dimension of solid particles. Soil texture, bulk density and soil moisture at 9 pressure heads 0, 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000 and 1500 kPa were measured and used for determining the parameters of Van Genuchten equation (m and α) in RETC software. Also fractal dimension of solid particles was determined based on clay percentage and used for estimating the moisture contents in Brooks and Corey and Van Genuchten equations.

Results: The results showed that correlation coefficient (r) values between measured and estimated soil moisture contents were slightly high (>0.86) in all soil texture classes, i.e. silty clay, loam and sandy loam and the precision of models in estimating soil moisture contents for silty loam class was higher than other classes. Also, using of fractal dimension for estimating the α parameter of Van Genuchten equation had the high precision ($r>0.99$ and $RMSE<0.02$) in all 3 soil textures. The precision of estimated m parameter in Van Genuchten equation by using of fractal dimension in sandy loam class was low ($r=0.49$; $RMSE=0.066$), but in loam ($r=0.49$; $RMSE=0.06$) and specially in silty clay ($r=0.88$; $RMSE=0.065$) soil texture class was high.

Conclusion: In general, the results of this research showed that using fractal dimension for estimation of the hydraulic characteristics has a high precision in moderate classes and as well as fine soil texture is high and its efficiency is low in coarse textures.

Keywords: Fractal, Soil moisture, Soil texture

* Corresponding Authors; Email: hemami@um.ac.ir