پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۶ تا ۸ شهریور ۱۳۹۶ محور مقاله: فیزیک و رابطه آب خاک و گیاه

ارزیابی مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک

سیده ویدا حسینی[۱]*، مسعود داوری [۲] و محمدعلی محمودی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، ۲ و ۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

چکیده

منحنی مشخصه رطوبتی خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک، در مدل‌سازی جریان آب و انتقال توأمان آب و املاح در بخش غیراشباع خاک کاربرد دارد. اندازه‌گیری مستقیم منحنی‌های نگه‌داشت آب در خاک دشوار، زمان-بر و پرهزینه می‌باشد؛ بدین منظور محققین روش‌هایی غیرمستقیم همچون مدل‌های تجربی و توابعی انتقالی را برای تخمین منحنی رطوبتی خاک پیشنهاد کرده‌اند. در این پژوهش، کارایی مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی شش نوع کلاس بافتی خاک، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با مدل‌های تجربی بروکس و کوری (۱۹۶۴)، کمپل (۱۹۷۴) و مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) نیز مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل تجربی بروکس و کوری (۱۹۶۴) و مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) بهترین تخمین را از منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های دارای کلاسی بافتی مختلف ارائه کردند. نتایج همچنین نشان داد، مدل کمپل (۱۹۷۴) درمقایسه با دیگر مدل‌ها در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارای دقت کمتری بوده و تنها برای خاک‌های درشت بافت کارایی بالایی دارد.

کلمات کلیدی: مدل فرکتالی، مدل‌های تجربی، منحنی مشخصه رطوبتی خاک

مقدمه

منحنی مشخصه رطوبتی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای مدل‌سازی جریان آب در محیط‌های غیر-اشباع می‌باشد. برغم پیشرفت‌های صورت گرفته در روش‌های مستقیم اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک، این روش‌ها هم‌چنان دشوار، پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند (Wosten *et al*., 2001). افزون بر این، منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک دارای تغییر پذیری زمانی و مکانی قابل‌توجهی نیز هستند که برای رفع این مشکل، نمونه‌برداری‌هایی فراوان و به‌تبع آن کارهای آزمایشگاهی زیادی باید صورت گیرد. شایان ذکراست که بیشتر این روش‌های مستقیم اندازه‌گیری منحنی رطوبتی خاک، در دامنه رطوبتی ویژه‌ای قابل کاربرد می‌باشند (Minasny *et al*., 1999). بنابراین، با توجه به مشکلات ذکر شده در اندازه‌گیری-های مستقیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک، نیاز به روش‌هایی غیرمستقیم به‌منظور مدل کردن آن اجتناب ناپذیر می‌باشد. از روش‌های غیر مستقیم تخمین منحنی نگه‌داشت آب در خاک می‌توان به مدل‌های مبتنی برتوزیع اندازه خلل و فرج خاک (Arya and Paris, 1980) توابع انتقالی (PTFs)[۱] (Wosten *et al*., 2001)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Minasny and McBratney, 2007) و روش‌های مدل‌سازی معکوس (Mertens *et al*., 2006) اشاره کرد. در اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیر-مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و مدل‌سازی آن‌ها، اشکال موجود در خاک دارای هندسه ایده‌آل (همچون کره، دایره و خط) در نظر گرفته می‌شوند. حال این که فرض منظم بودن چنین اشکال نامنظمی، باعث ایجاد خطاهای غیرقابل کنترل در اندازه‌گیری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی خصوصیات خاک می‌شود. بنابراین، تکنیک‌های هندسی همچون هندسه‌ی فرکتالی که قادر به توصیف بی‌نظمی اجسام در مقیاس‌های مختلف می‌باشند، مورد توجه قرار می‌گیرند (Perfect and Kay,1995). از آنجا که توزیع اندازه منافذ و ذرات خاک در تعیین ویژگی‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک نقشی مهم داشته و از طرفی این دو

[1] Pedotransfer Functions

ویژگی رفتاری فرکتالی از خود نشان داده‌اند، لذا پیشنهاد مدل‌های مبتنی بر هندسه فرکتال توسط برخی از محققین مورد توجه قرار گرفته‌است (Perfect and Kay,1995). Tylerو Wheatcraft (۱۹۹۰) از الگوی سنگ فرش سرپینسکی برای توصیف اندازه خلل و فرج در خاک استفاده نموده و یک رابطه توانی مشابه معادلات تجربی Brooks و Corey (۱۹۶۴) و Campbell (۱۹۷۴) ارائه دادند. رابطه نهایی tyler و Wheatcraft (۱۹۹۰) در زیر آورده شده است:

$$\theta = \theta_s (h/h_0)^{D_m - s} \quad (۱)$$

که در آن، h مکش اعمال شده به خاک، h_0 مکش در نقطه ورود هوا به خاک، θ رطوبت حجمی خاک در مکش معادل h، θ_s رطوبت حجمی خاک در وضعیت اشباع و D_m نیز بعد فرکتالی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.

با توجه به دشواری، زمان‌بر بودن و هزینه بالای روش‌های مستقیم تعیین منحنی رطوبتی خاک و با توجه به این‌که خصوصیات توزیع اندازه ذرات و منافذ خاک دارای خاصیتی فرکتالی می‌باشند؛ لذا می‌توان برای تخمین منحنی نگه‌داشت آب در خاک از مدل‌های فرکتالی پیشنهادی در این زمینه استفاده کرد. بنابراین در این پژوهش تلاش شد کارایی مدل فرکتالی Tyler و Wheatcraft (۱۹۹۰) در برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک ارزیابی شده و با مدل‌های تجربی بروکس و کوری (۱۹۶۴)، کمپل (۱۹۷۴) و ون‌گنوختن (۱۹۸۴) مقایسه شده است.

مواد و روش

در این پژوهش تعداد ۵۰ نمونه خاک سطحی دست‌خورده و دست‌نخورده، که از اراضی کشاورزی واقع در دشت‌های شهرستان‌های قروه – دهگلان جمع‌آوری شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌ها به روش تصادفی جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هوا خشک شدن برای انجام آزمایش‌ها و حذف سنگریزه‌ها و بقایای گیاهی از الک ۲ میلیمتری عبور داده شدند. سپس با استفاده از نمونه های دست نخورده جرم مخصوص ظاهری و منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری خاک با بهره‌گیری از روش استوانه‌های فلزی تعیین شد (Black and Hartge, 1986). برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک در مکش‌های ماتریک ۱۰، ۳۳، ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال از دستگاه صفحات فشاری و در مکش های ماتریک ۵۰۰، ۱۰۰۰ و۱۵۰۰ کیلو پاسکال از دستگاه غشاء فشاری استفاده شد.

با استفاده از نمونه‌های دست خورده‌ی آون خشک عبور داده شده از الک ۲ میلی متری خصوصیات فیزیکی خاک همچون توزیع اندازه ذرات رس و سیلت به روش هیدرومتری، توزیع اندازه ذرات شن به روش الک کردن (Gee and Or, 2002) و جرم مخصوص حقیقی نمونه‌ها به روش پیکنومتر (Blake and Hartge., 1986) اندازه‌گیری شد. تخلخل خاک نیز از طریق محاسبه نسبت جرم مخصوص ظاهری به جرم مخصوص حقیقی و بهره‌گیری از رابطه $f = 1 - \rho_b / \rho_s$ تعیین شد (Danielson and Sutherland, 1986).

در این پژوهش برای ارزیابی دقیق و مقایسه کمی مدل‌ها از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. بیان ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^{N} (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (۳)$$

که در آن‌ها، y_i و $\hat{y}_i$ به‌ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، $\bar{y}$ و $\bar{\hat{y}}$ به‌ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، P تعداد پارامترها و N نیز تعداد داده‌ها می‌باشد. شایان ذکر است هر چه مقدار R^2 به یک و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد خطای برآوردی مدل کمتر می‌باشد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ نتایج حاصل از آماره‌های RMSE و R^2 در ارزیابی چهار مدل پیش‌بینی کننده منحنی مشخصه رطوبتی خاک برای همه کلاس‌های بافتی مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از آماره‌های ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی کننده منحنی مشخصه رطوبتی خاک همه کلاس‌های بافتی مورد مطالعه

نوع مدل	RMSE (cm^3/cm^3)	R^2
تایلر و ویت‌کرافت	۰/۰۴	۰/۹۹
بروکس و کوری	۰/۰۴	۰/۹۶
ون‌گنوختن	۰/۰۵	۰/۹۰
کمپل	۰/۱۲	۰/۶۶

همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود مدل‌های بروکس و کوری (۱۹۶۴)، ون‌گنوختن (۱۹۸۴) و تایلر و ویت-کرافت (۱۹۹۰)، به‌دلیل R^2 بالاتر و RMSE کمتر، در مقایسه با مدل کمپل (۱۹۷۴) در تخمین منحنی‌های نگه‌داشت آب در خاک از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. در جدول ۲ نیز نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌های برآورد کننده منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از آماره‌های R^2 و RMSE، به تفکیک هر کلاس بافتی ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از این جدول، بهترین پیش‌بینی‌ها برای خاک‌هایی با بافت سنگین (رس، رس سیلتی و لوم رس سیلتی) توسط مدل تجربی ون-گنوختن به‌دست آمده است. این درحالی است که مدل تجربی ون‌گنوختن به خوبی سایر مدل‌ها، قادر نیست منحنی مشخصه رطوبتی خاک را برای بافت‌های متوسط و سبک (لوم و لوم شنی) پیش‌بینی نماید. نتایج همچنین نشان داد که مدل تایلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های سبک بافت نتایجی قابل قبول‌تر ارائه می‌کند. همچنین پیش‌بینی‌های مدل کمپل تنها برای خاک سبک لوم شنی از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و در پیش‌بینی سایر کلاس‌های بافتی خاک دقت کافی را دارا نمی‌باشد. با توجه به نتایج، مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) ۰/۰۴ تا ۰/۱۳، برای مدل کمپل (۱۹۷۴) ۰/۱۲ تا ۰/۴۴، برای مدل ون گنوختن (۱۹۸۰) ۰/۰۷ تا ۰/۱۴ و برای مدل تایلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) از ۰/۰۴ تا ۰/۱۴ برای خاک‌های مورد مطالعه متغیر می‌باشد. شایان ذکر است که مقدار ضریب تبیین (R^2) برای مدل بروکس و کوری (۱۹۶۴) ۰/۷۹ تا ۰/۹۶، برای مدل کمپل (۱۹۷۴) ۰/۶۵ تا ۰/۶۶، برای مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) ۰/۷۵ تا ۰/۹۰ و برای مدل تایلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) از ۰/۸۵ تا ۰/۹۹ متغیر می‌باشد. این نتایج نیز تأییدی بر این موضوع است که دقت مدل‌های بروکس و کوری (۱۹۶۴)، ون‌گنوختن (۱۹۸۴) و تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) در مقایسه با مدل کمپل (۱۹۷۴) بالاتر می‌باشد.

با توجه به مقادیر RMSE و R^2 بدست آمده برای بافت‌های مختلف خاک (نتایج جدول ۲) می‌توان این‌گونه بیان کرد که برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های سبک بافتی همچون لوم شنی به ترتیب مدل‌های تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰)، بروکس و کوری (۱۹۶۴) و ون‌گنوختن (۱۹۸۴) و در نهایت مدل کمپل (۱۹۷۴) دقت قابل قبولی را دارا می‌باشند. در خاک‌های دارای کلاس بافتی حدواسطی همچون لوم و لوم سیلتی مدل‌های بروکس و کوری (۱۹۶۴)، تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) و ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و در خاک‌های با کلاس بافتی سنگین همچون رس، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی، به ترتیب مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۴)، بروکس و کوری (۱۹۶۴) و تایلر و ویت کرافت (۱۹۹۰) بیشترین دقت را دارا می‌باشند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) در پیش‌بینی منحنی

مشخصه رطوبتی خاک دارای دقت بالایی بوده و برای پیش‌بینی منحنی نگه‌داشت آب، در خاک‌های دارای کلاس‌های بافتی مختلف می‌توان از این مدل استفاده کرد.

جدول ۲- نتایج حاصل از آماره‌های ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه جهت پیش بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک به تفکیک هر کلاس بافتی

مدل‌ها	تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰)		بروکس و کوری		ون‌گنوختن		کمپل	
کلاس بافتی	R^2	RMSE (cm^3/cm^3)	R^2	RMSE (cm^3/cm^3)	R^2	RMSE (cm^3/cm^3))	R^2	RMSE (cm^3/cm^3)
رسی	۰/۸۹	۰/۱۱	۰/۹۶	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۰۷	۰/۸۱	۰/۲۱
رسی سیلتی	۰/۸۹	۰/۱۴	۰/۹۴	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۸۷	۰/۳۰
لوم رسی سیلتی	۰/۹۴	۰/۰۸	۰/۹۶	۰/۰۸	۰/۹۶	۰/۰۷	۰/۸۲	۰/۱۸
لوم	۰/۸۹	۰/۱۳	۰/۹۱	۰/۰۷	۰/۷۵	۰/۱۴	۰/۶۷	۰/۱۳
لوم سیلتی	۰/۹۲	۰/۱۳	۰/۹۲	۰/۱۲	۰/۸۷	۰/۰۹	۰/۷۵	۰/۲۴
لوم شنی	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۹۶	۰/۰۸	۰/۸۶	۰/۰۹	۰/۸۲	۰/۱۶

قنبریان و همکاران (۱۳۸۶) از مدل فرکتالی پرفکت (۱۹۹۹) و مدل‌های تجربی بروکس و کوری (۱۹۶۴)، ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و کمپل (۱۹۷۴) استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که مدل پرفکت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک-های دارای کلاس بافتی مختلف، در مقایسه با دیگر مدل‌های تجربی از خطای کمتری برخوردار می‌باشد. فاضلی و همکاران (۲۰۱۰) نیز مدل‌های تجربی و مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) را در تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک مقایسه کردند. یافته‌های این محققین نشان داد که بعد فرکتال جرمی به‌دست آمده از بافت خاک، در دامنه‌ای بین ۲/۹۵ برای خاک-های رسی تا ۲/۶۱ برای خا ک‌های شنی متغیر می‌باشد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که مدل تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های سبک بافت نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌کند. این در حالی است که بین مدل فرکتالی تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۹۰) و مدل تجربی کمپل (۱۹۷۴)، زمانی که بعد فرکتال از بافت خاک تخمین زده شود، تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

فهرست منابع

قنبریان، ب. و لیاقت، ع.م. و شرفاء، م. و مقیمی، س. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل فرکتالی پرفکت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد۱، شماره۱. صفحه‌های۱۳-۱.

Arya, L.M. and Paris, J.F. 1981. A physicoemprical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, 45: 1023-1030.

Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical methods, 2nd ed., Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI, 9: 363-375.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University. Hydrology: 3 P.

Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Science Society of America Journal, 117(6), pp:311-314.

Danielson, R.E. and Sutherland, P.L. 1986. Porosity. In: Klut, A. (Ed), Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods, WI, pp: 443-461.

Fazeli, M., Shorafa, M., Khojasteh, D.N. and Shahri, A.P. 2010. A fractal approach for estimating soil water retention curve. Journal of Soil Science and Environmental Management, 1(7), pp:177-183.

Gee, GW. and Or, D. 2002. Particle-size analysis Pp:.255-295.In: Warren AD (Ed). Method of soil analysis. Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America Incorporation., USA.

Mertens, J., Stenger, R. and Barkle, G.F. 2006. Multi objective inverse modeling for soil parameter estimation and model verification. Vadose Zone Journal, 5: 917-933.

Minasny, B., McBratney, A.B. and Bristow, K.L. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer function for water-retention curves. Geoderma, 93: 225-253.

Minasny, B. and McBratney, A.B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand clay content. Soil Science Society of America Journal, 71(4): 1105-1110.

Perfect, E. and Kay, B.D. 1995. Aplication of fractal in soil, and tillage research: A review. Soil and Tillage Research, 36: 1-20.

Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1990. Fractal processes in soil water retention. Water Resources Research, 26: 1047-1054.

Wosten, J.H.M., Pachepsky, Y.A. and Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer function: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics, Journal of Hydrolology, 251: 123-150.

Evaluating Tyler and Wheatcraft's Fractal model in prediction of soil moisture characteristic curve

S. V. Hosseini[1 *], M. Davari[2] and M. A. Mahmoodi[3]

1. M. Sc. student, Soil Science Department, University of Kurdistan
2, 3. Assist. Prof. of Soil Science, Soil Science Department, University of Kurdistan

Abstract

Soil moisture characteristic curve (SMCC) is an important hydraulic property for modeling water flow and solute transport in the unsaturated soil. Direct measurements of SMCC is difficult, costly and time-consuming. Therefore, many indirect methods such as empirical models and pedotransfer functions (PTFs) have proposed by soil scientists. In this study, Tyler and Wheatcraft's (1990) Fractal model was used to estimate SMCC of 50 soil samples, and its result was compared with the results obtained from Brooks and Corey (1964), Campbell (1974) and van-Genuchten's (1980) empirical models. The results showed that the Brooks and Corey's (1964) empirical model and Tyler and Wheatcraft's (1990) fractal model were the best in estimation of SMCC for different texture soils. The results also indicated that the Campbell's (1970) model had a less accurate than the other models. This model exhibited good prediction only for light texture soils.

Keywords: Empirical models, Fractal models, Soil Moisture Characteristic Curve