

## ارزیابی سه مدل فراکتالی برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک

پریسا کهخا مقدم<sup>۱</sup>، علیرضا سپاسخواه<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵

### چکیده

پارامترهای هیدرولیکی خاک (منحنی مشخصه آب خاک) برای تعیین حرکت آب و املاح در خاک از پایه‌های اساسی است که اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها زمان‌بر و هزینه‌بر است. برای حل این مشکل روش‌های غیر مستقیم ارائه شده است که یکی از این روش‌ها تحلیل فراکتالی است. مدل Pore-Solid Fractal (PSF) توسط پژوهشگران زیادی برای مدل‌سازی ساختار خاک و تابع نگهداری آب- خاک بکار برده شده است. مدل PSF یک بیان عمومی برای تابع نگهداری آب- خاک است که بصورت‌های خاص دیگری هم توسط پژوهشگران دیگر ارائه شده است. هدف این تحقیق ارزیابی تابع عمومی PSF بر اساس بعد فراکتالی با داده‌های مکش- آب خاک و مقایسه آن با مدل‌های بروکس - کوری و تیلر - ویت کرافت می باشد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده که از منابع منتشر شده بدست آمد، منحنی مشخصه آب خاک برای خاک‌های مورد بررسی با تابع PSF، حالت‌های خاص آن (بروکس - کوری و تیلر - ویت کرافت) بدست آمد. برای درک صحت نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای بین رطوبت‌های پیش بینی شده از مدل‌های مورد بررسی و رطوبت‌های اندازه‌گیری شده برای خاک‌هایی از بانک UNSODA صورت گرفت. نتایج نشان داد که برای خاک‌های مورد بررسی تابع تیلر- ویت کرافت در مقایسه با تابع PSF و تابع بروکس-کوری تطابق بهتری را نشان می دهد. برای محاسبه مکش ورود هوا ( $h_{min}$ ) و رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ ) نیز استفاده از هر کدام از معادلات PSF، و تیلر - ویت کرافت، و بروکس - کوری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند. اما برای محاسبه بعد فراکتال ( $D$ ) استفاده از معادله تیلر - ویت کرافت توصیه می شود. با استفاده از پارامترهای زود یافت خاک مدل‌های ساده تجربی به صورت رابطه‌ای میان میانگین هندسی ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) ذرات خاک با  $h_{min}$  و  $\theta_s$  و  $D$  بدست آمد. سپس به کمک آن برای خاک‌هایی از بانک UNSODA، معادله منحنی مشخصه تخمین زده شد. بدون توجه به بافت خاک تمامی رطوبت‌های حجمی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با خط یک به یک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین رطوبت پیش‌بینی شده ( $\theta_p$ ) و اندازه‌گیری شده ( $\theta_m$ ) با خط یک به یک وجود ندارد. بنابراین بنظر می‌رسد که مدل‌های ساده تجربی ارائه شده قادر است منحنی مشخصه آب خاک را با دقت قابل قبولی تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، بعد فراکتال، منحنی رطوبتی.

۱. مربی گروه مهندسی آب دانشگاه زابل، ۰۹۱۵۵۴۴۱۵۴۰، keykhamoghadam.parisa@gmail.com

۲. استادگروه مهندسی آب دانشگاه شیراز، ۰۹۱۷۷۰۱۰۱۹۲، sepas@shiraz.ac.ir (مسئول مکاتبه)

## مقدمه

شناخت بسیاری از فرایندهای مهم در کشاورزی و محیط زیست نیاز به داشتن اطلاعات کافی در زمینه فیزیک خاک دارد. فیزیک خاک وضعیت اجزاء سه گانه خاک (ذرات جامد، مایع و گاز) را مورد بررسی قرار می دهد. بخش غیراشباع خاک اهمیت فراوانی در چرخه آبی طبیعت دارد. یکی از مهم ترین شاخص هایی که ویژگی های این بخش را به صورت کمی بیان می کند، منحنی مشخصه آب خاک است که در بسیاری از پژوهش ها به عنوان اطلاعات پایه مورد استفاده قرار می گیرد.

نظریه فراکتالی برای بیان رشد و توسعه در سیستم های پویای طبیعی و غیر طبیعی بکار برده شده است. کاربرد نظریه فراکتالی برای تعیین ثبات خاکدانه ها کاملاً موفقیت آمیز بوده و اثرات کاربرد کود شیمیایی فسفره، مواد شیمیایی و مواد نفتی را در ثبات خاکدانه ها به خوبی بیان می کند. همچنین تاثیر انواع خاک ورزی و تناوب کشت محصولات زراعی مختلف را بر ساختمان خاک بیان می نماید. کاربرد این نظریه منجر به ارائه معادله هایی برای منحنی های مشخصه آب- خاک، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و اشباع خاک و اندازه درشت منفذها در خاک می شود. از نظریه فراکتالی می توان برای تعیین چگونگی ریشه افشانی گیاهان زراعی نیز استفاده کرد. تغییرات زمانی بلند مدت و کوتاه مدت محصول گیاهان زراعی نیز توسط نظریه فراکتالی قابل بیان است. حتی برای بیان تراکم و یکنواختی شبکه آبراهه های زهکشی در حوضه های آبریز نیز می توان از نظریه فراکتالی استفاده کرد (سپاس خواه، ۱۳۹۰).

تابع مکش- آب خاک رابطه بین رطوبت و پتانسیل ماتریک آب خاک را بیان می کند و ویژگی هیدرولیکی مهمی برای مطالعه جریان در خاک های غیر اشباع است. مدل های مختلفی برای بیان خصوصیات تابع مکش- آب خاک بیان شده اند (Brooks and Corey, 1964; Tyler and Wheatcraft, ) (1990; Rieu and Sposito, 1990). در علوم خاک

نشان داده شده است که نظریه فراکتال می تواند اندازه متوسط خلل و فرج را توصیف کند. در سال های اخیر یافته های نظریه فراکتال برای مدل های دانه بندی (Perfect and Turcotte, 1986)، ذرات جامد خاک (Kay, 1991) و توزیع اندازه ذرات (Perrier and Bird, 2002) و توزیع اندازه ذرات (Perrier and Bird, 2002) و توزیع اندازه ذرات گسترش پیدا کردند. مقیاس فراکتالی به عنوان یک روش برای ارزیابی خصوصیات متغیر خاک پیشنهاد شده است. مقیاس فراکتالی برای توزیع اندازه ذرات خاک در کنترل بسیاری از واکنش های استاتیک و دینامیک خاک مانند انتقال آب و مواد محلول، ظرفیت نگهداری آب، ذخیره حرارتی و هدایت هیدرولیکی و ... مورد بررسی های گسترده قرار گرفته است (Ersahin et al., 2006).

تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک بروش عملی گران بوده و نیازمند آزمایشگاه و وقت فراوان می باشد. برای حل این مشکل روش های غیر مستقیم ارائه شده است که یکی از این روش ها تحلیل فراکتالی است که برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده می گردد (Medina et al., 2006). مدل Pore- Solid Fractal (PSF) توسط Perrier and Bird (2002) گسترش پیدا کرد (Perrier and Bird, 2002) روش فراکتال را برای مدل سازی ساختار خاک تعمیم دادند. Bird et al (2000) بر اساس تئوری PSF منحنی مشخصه آب- خاک را ارائه دادند. نتیجه مدل PSF بیان یک مدل عمومی برای منحنی مشخصه آب- خاک است. منحنی مشخصه آب- خاک Tyler and Brooks and Corey (1964) و Wheatcraft (1990) حالت های خاص منحنی مشخصه آب- خاک PSF می باشند. هدف این تحقیق ارزیابی تابع عمومی PSF بر اساس بعد فراکتالی، با داده های مکش- آب خاک و مقایسه آن با مدل های خاص PSF، مانند Brooks and Corey (1964) و Tyler and Wheatcraft (1990) می باشد.

اگر  $\beta = (\theta_s - \theta_r)$  باشد، که  $\theta_r$  رطوبت ته مانده آب خاک است، معادله Brooks and Corey (۱۹۶۴) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{h}{h_a} \right)^{-\lambda} \quad (۶)$$

که در آن  $\theta_r$ : رطوبت ته ماند ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )،  $h_a$ : مکش ورود هوا (cm)، که معادل  $h_{\min}$  در معادله (۴) می‌باشد و  $\lambda$ : شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشد. در مقایسه معادله (۴) با معادله (۶) می‌توان دید که اگر  $\beta = \theta_s - \theta_r$  و  $\lambda = 3 - D$  باشد این دو معادله به صورت ذاتی و اساسی با هم مشابه‌اند.

این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده به وسیله خشنود یزدی و قهرمان (۱۳۸۳) انجام گردید. منحنی مشخصه آب خاک برای خاک‌های مورد بررسی با تابع PSF و حالت‌های خاص آن یعنی تابع تایلر و ویت گرفت (۱۹۹۰) و تابع بروکس و کوری (۱۹۶۴) بدست آمد.

جدول ۱ اطلاعات اساسی مجموعه داده‌های ۵۰ خاک استفاده شده در این تحقیق شامل حداقل، حداکثر، میانگین، و انحراف معیار درصد شن و رس خاک‌ها و شکل ۱ خاک‌های استفاده در این تحقیق را در مثلث بافت خاک را نشان می‌دهد. درصد رس خاک‌ها از ۱۴٪ تا ۵۶٪ متغیر است.

برای به دست آوردن منحنی مشخصه آب خاک به این صورت عمل شد که با استفاده از نرم افزار SPSS معادلات ترکیبی متفاوتی به داده‌ها برازش داده شد تا بهترین معادله بدست آید و با محاسبه میانگین پارامترهای مربوط به تک تک خاک‌های تشکیل دهنده هر دسته بافت خاک، معادله منحنی مشخصه آن تعیین شد. پس از بدست آوردن منحنی مشخصه آب خاک برای معادلات ذکر شده با استفاده از داده‌های بانک UNSODA (جدول الف-۲ و ب-۲) صحت معادلات بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت. برای

## مواد و روش‌ها

Bird et al (2000) با استفاده از تئوری PSF منحنی رطوبتی آب خاک را استخراج کردند. تابع PSF به صورت زیر بیان شده است:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (۱)$$

$$\theta = \phi - \frac{P}{P+s} \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_{\min}} \right)^{D-d} \right]$$

که در آن  $\theta$ : رطوبت حجمی ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )،  $h$ : ارتفاع مکش (cm)،  $\Phi$ : کل تخلل خاک ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )،  $P$  و  $S$  به ترتیب نسبت حجم اشغال شده بوسیله منافذ و ذرات جامد ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )،  $h_{\min}$  و  $h_{\max}$ : مکش در کوچکترین و بزرگترین منافذ (cm)،  $d$ : بعد اقلیدسی و  $D$ : بعد فراکتال در PSF می‌باشد. با جایگذاری  $d=3$

$$\beta = \frac{P}{P+s} \quad (۲)$$

خواهیم داشت:

$$\theta = \phi - \beta \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_{\min}} \right)^{D-3} \right]$$

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (۳)$$

با فرض این که منافذ خاک کاملاً اشباع باشند معادله (۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\theta = (\theta_s - \beta) + \beta \left( \frac{h}{h_{\min}} \right)^{D-3} \quad (۴)$$

که در آن  $\theta_s$  رطوبت اشباع ( $\theta_s = \Phi$ ) می‌باشد.

اگر  $\beta = \theta_s$  باشد، معادله (۴) برابر با معادله Tyler and Wheatcraft (1990) به صورت زیر می‌شود:

$$\theta(h) = \theta_s \left( \frac{h}{h_a} \right)^{(D-3)} \quad (۵)$$

خاک می‌توان میانگین هندسی ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) ذرات خاک را محاسبه نمود. این روابط از طریق رگرسیون گیری چند گانه بین هر کدام از پارامترهای بهترین مدل به صورت جداگانه با  $d_g$  و  $\sigma_g$  ۵۰٪ سری خاک مورد بررسی، با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت. سپس برای اعتبارسنجی معادلات ساده بدست آمده برای بافت‌های مختلف خاک، آن‌ها را برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک برای بافت‌های مختلف خاک انتخاب شده از بانک اطلاعاتی UNSODA به کار برده و نتایج با رطوبت خاک به دست آمده با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه گردید. خاک های UNSODA مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده اند. نحوه محاسبه این معادله‌ها (میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی) به صورت زیر می‌باشد.

$$d_g = e^a \quad (9)$$

$$a = 0.01 \sum_{i=1}^n F_i \times \ln(M_i) \quad (10)$$

$e$ : لگاریتم پایه طبیعی (۲/۷۱۸۳)،  $F_i$ : درصد اندازه ذرات،  $M_i$ : میانگین اندازه ذرات (mm)، که مقدار آن برای رس، سیلت و شن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۰۲۶ و ۱/۰۲۵ می‌باشد.

$$\sigma_g = e^b \quad (11)$$

$$b^2 = \left[ 0.01 \sum_{i=1}^n F_i \times (\ln M_i)^2 \right] - a^2 \quad (12)$$

تحلیل آماری معادلات از ریشه مربع میانگین خطاهای نرمال شده (NRMSE)، و ضریب توافق (d)، استفاده گردید. معادلات استفاده شده به صورت ذیل می‌باشد:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum(\theta_p - \theta_m)^2 / n}}{\bar{\theta}_m} \quad (7)$$

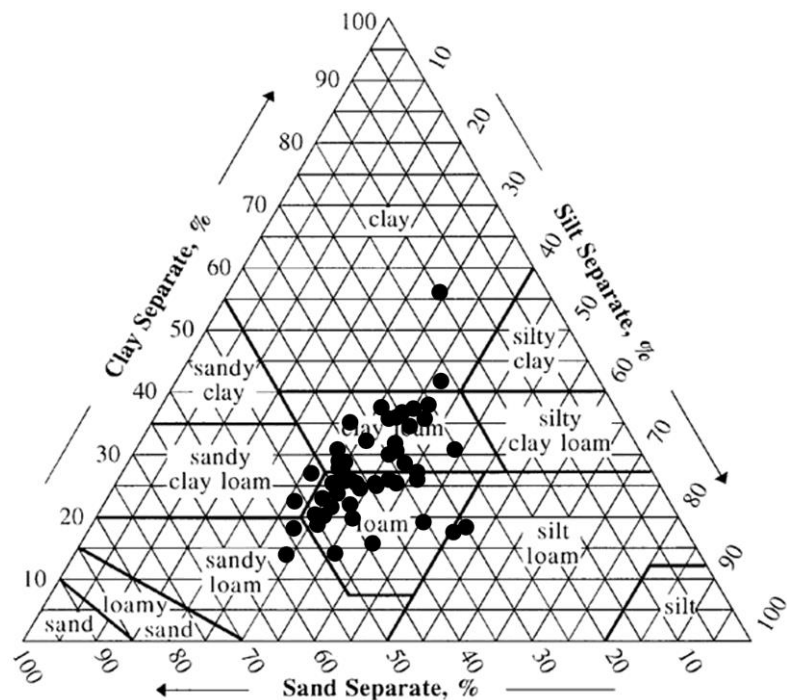
که در آن NRMSE: ریشه مربع میانگین خطاهای نرمال شده،  $\theta_p$ : رطوبت پیش بینی شده توسط معادلات مورد بررسی،  $\theta_m$ : رطوبت اندازه‌گیری شده در بانک UNSODA،  $n$ : تعداد رطوبت‌های مورد بررسی در هر خاک،  $\bar{\theta}_m$ : میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده توسط معادلات مورد بررسی می‌باشد.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \left| P_i' \right| + \left| O_i' \right| \right)^2} \quad (8)$$

$$O_i' = O_i - \bar{O} \text{ و } P_i' = P_i - \bar{O}$$

که در آن d: ضریب توافق،  $P$ : رطوبت پیش بینی شده توسط معادلات مورد بررسی،  $O$ : رطوبت اندازه‌گیری شده در بانک UNSODA،  $\bar{O}$ : میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده در بانک UNSODA، و  $N$ : تعداد رطوبت‌های مورد بررسی در هر خاک می‌باشد.

به دلیل رسیدن به رابطه‌ای ساده‌تر برای اینکه بتوان تنها با داشتن پارامترهای زود یافت خاک به معادله منحنی مشخصه خاک‌های مورد بررسی دست یافت، سعی بر آن شد رابطه‌ای بین پارامترهای بهترین مدل (Tyler and Wheatcraft) با پارامترهای زود یافت خاک بدست آید. با استفاده از پارامترهای زود یافت



شکل (۱): مثلث بافت خاک که در آن نمونه خاک های استفاده شده نشان داده شده است

جدول (۱): اطلاعات اساسی داده های خاک

بافت خاک	تعداد بافت	رس (%)		شن (%)	
		میانگین ± انحراف معیار	کمترین بیشترین	میانگین ± انحراف معیار	کمترین بیشترین
Sandy loam (لوم شنی)	۲	۲/۴±۱۶/۴	۱۴-۱۸/۸	۱/۸±۵۵	۵۲/۲-۵۶/۸
Silt loam (لوم سیلتی)	۲	۰/۴±۱۸/۴	۱۸-۱۸/۸	۱/۴±۳۰/۶	۲۹/۲-۳۲
Loam (لوم)	۲۰	۳/۷۷±۲۲/۹۶	۱۴-۲۸	۴/۷۳±۴۲/۷۲	۳۳/۶-۵۰
Loam-Clay loam (لوم-لوم رسی)	۳	۰/۷۳±۲۷/۷۶	۱۹/۳-۲۸/۸	۵/۵۸±۳۹/۵	۳۱/۶-۴۳/۶
Sandy clay loam (لوم رسی شنی)	۲	۱/۳۵±۲۴/۶۵	۲۳/۳-۲۶	۱/۶۵±۴۷/۶۵	۴۶-۴۹/۳
Clay loam (لوم رسی)	۱۹	۳/۷۱±۳۲/۴۲	۲۳/۳-۳۷/۲	۵/۷۸±۳۳/۶۶	۲۵/۲-۴۵/۳
Clay (رس)	۲	۷/۶۰±۴۸/۴	۴۰/۸-۵۶	۳/۶±۱۸/۴	۱۴/۸-۲۲

## نتایج و بحث

مطابق آنچه در قبل ذکر شد پارامترهای مجهول معادله (۴) تخمین زده شدند. خلاصه برآوردها در

جدول ۷ نشان داده شده است. روند تغییرات مقادیر بعد فراکتالی خاک (D) چنین می باشد:

Sandy loam < Silt loam < Loam-Clay loam < Loam < Clay loam < Sandy clay loam < Clay  
(لوم شنی) < لوم سیلتی < لوم-لوم رسی < لوم < لوم رسی < لوم رس شنی < رس

موثر در بعد فراکتال خاک، میزان درصد رس خاک است، که با بالا رفتن درصد آن بعد فراکتال به عدد بزرگتری میل پیدا می کند.

کوچکترین بعد فراکتال ۲/۶۹ می باشد که مربوط به بافت Sandy loam (لوم شنی)، و بزرگترین آن مربوط به بافت Clay (رس) با مقدار ۲/۹۲ است. این مسئله می تواند بیانگر این مهم باشد که یکی از عوامل

جدول (۲): داده‌های درصد رس، سیلت، شن، و چگالی ظاهری استفاده شده از بانک UNSODA برای بافت خاک‌های مختلف

چگالی ظاهری (gr cm <sup>-3</sup> )	شن (%)	لای (%)	رس (%)	شماره خاک	بافت خاک
۱/۳۸	۴۹/۸	۴۲/۴	۷/۸	۱۳۸۰	Sandy loam (لوم شنی)
۱/۰۱	۵۱/۷	۲۹/۸	۱۸/۵	۲۷۵۰	Loam (لوم)
۱/۲۷	۵۵	۱۹/۲	۲۵/۸	۲۶۳۰	Sandy clay loam (لوم رسی شنی)
۱/۵۱	۳۴/۱	۴۶/۱	۱۹/۸	۳۲۲۱	Silt loam (لوم سیلتی)
۰/۷۳	۳۰/۷	۳۹/۶	۲۹/۷	۲۷۴۰	Clay loam (لوم رسی)
۱/۴۷	۲۳/۲	۲۹/۹	۴۶/۹	۲۶۲۲	Clay (رس)

که خاک Loam- Clay loam (لوم- لوم رسی) را شامل نبود و برای خاک هایی که بافتی مشابه خاک های این تحقیق داشتند روند تغییرات D به صورت زیر می باشد:

Sandy loam < Silt loam < Loam < Clay loam < Clay < Sandy Clay loam

(لوم شنی) < لوم سیلتی < لوم < لوم رسی < رس < (لوم رسی شنی)

اینکه با افزایش درصد رس خاک، مقدار بعد فراکتال نیز افزایش می یابد لذا طبیعی است که مقدار D در خاک Clay (رس) از خاک Sandy clay loam (لوم رسی شنی) بزرگتر باشد.

روند تغییرات  $h_{min}$  نیز به صورت ذیل است:

Sandy clay loam < Sandy loam < Loam < Clay loam < Loam-Clay loam < Silt loam < Clay

(لوم رسی شنی) < لوم شنی < لوم < لوم رسی < لوم-لوم رسی < لوم سیلتی < رس

در تحقیقی که Wang et al, 2005 انجام دادند، مقادیر بعد فراکتال را برای خاک هایی با بافت های مختلف با استفاده از مدل PSF بدست آوردند. این محققین ۱۲ دسته خاک را مورد آزمایش قرار دادند

کوچکترین مقدار D برای خاک Sandy loam (لوم شنی) برابر ۲/۶۶ و بیشترین مقدار D برای خاک Sandy Clay Loam (لوم رسی شنی) و برابر ۲/۹۱ و برای خاک Clay (رس) مقدار D برابر ۲/۹ می باشد. همان گونه که ذکر شد در این تحقیق بزرگترین مقدار D مربوط به خاک Clay (رس) است و با توجه به

مطابق آنچه در قبل ذکر شد پارامترهای مجهول معادله (۵) نیز تخمین زده شدند. خلاصه برآوردها در جدول ۸ نشان داده شده است روند تغییرات D و  $h_{min}$  در معادله (۵) و (۶) با کمی تفاوت، همان روند معادله (۴) را طی کرده است. معادله منحنی مشخصه آب-خاک برآورد شده از معادله (۵) در جدول ۴ قابل رویت می‌باشد.

کوچکترین مقدار  $h_{min}$  برابر ۳۲ سانتی متر، مربوط به بافت خاک Sandy clay loam (لوم رسی شنی)، و بزرگترین آن ۵۲/۳ سانتی متر، که مربوط به بافت Clay (رس) می‌باشد. در تحقیقی که Wang et al, 2005 انجام دادند نیز همین روند برای  $h_{min}$  مشاهده شد. مقادیر معادلات منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده از معادله (۴) برای بافت‌های مختلف خاک در جدول ۳ بیان شده است.

جدول (۳): معادلات منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده از معادله (۴)

معادله	بافت خاک
$\Theta = (\Theta_s - \beta) + \beta \times (h / h_{min})^{(D-3)}$	
$\Theta = 0.041 + 0.374 \times (h / 35.06)^{-0.306}$	loam Sandy (لوم شنی)
$\Theta = 0.023 + 0.478 \times (h / 40.80)^{-0.242}$	loam Silt (لوم سیلتی)
$\Theta = 0.041 + 0.460 \times (h / 38.77)^{-0.197}$	Loam- Clay loam (لوم- لوم رسی)
$\Theta = 0.027 + 0.455 \times (h / 36.27)^{-0.193}$	Loam (لوم)
$\Theta = 0.073 + 0.530 \times (h / 38.36)^{-0.153}$	loam Clay (لوم رسی)
$\Theta = 0.044 + 0.416 \times (h / 31.69)^{-0.144}$	loam clay Sandy (لوم رسی شنی)
$\Theta = 0.061 + 0.605 \times (h / 52.27)^{-0.77}$	Clay (رس)

جدول (۴): معادلات منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده از معادله (۵)

معادله	بافت خاک
$\Theta = \Theta_s \times (h / h_{min})^{(D-3)}$	
$\Theta = 0.412 \times (h / 36.25)^{-0.234}$	loam Sandy (لوم شنی)
$\Theta = 0.494 \times (h / 43.51)^{-0.220}$	loam Silt (لوم سیلتی)
$\Theta = 0.422 \times (h / 47.38)^{-0.166}$	Loam- Clay loam (لوم- لوم رسی)
$\Theta = 0.419 \times (h / 38.33)^{-0.177}$	Loam (لوم)
$\Theta = 0.453 \times (h / 41.63)^{-0.153}$	loam Clay (لوم رسی)
$\Theta = 0.376 \times (h / 31.89)^{-0.167}$	loam clay Sandy (لوم رسی شنی)
$\Theta = 0.446 \times (h / 52.03)^{-0.114}$	Clay (رس)

خلاصه برآوردها برای معادله (۶) نیز در جدول ۹ نشان داده شده است. همچنین معادله منحنی مشخصه برآورد شده در جدول ۵ لحاظ شده است.

جدول (۵): معادلات منحنی مشخصه آب خاک برآورد شده از معادله (۶)

معادله	بافت خاک
$\Theta = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) \times (h / h_a)^{(-\lambda)}$	
$\Theta = 0.044 + 0.367 \times (h / 37.07)^{-1.09}$	loam Sandy (لوم شنی)
$\Theta = 0.022 + 0.478 \times (h / 41.11)^{-1.44}$	loam Silt (لوم سیلتی)
$\Theta = 0.040 + 0.391 \times (h / 41.11)^{-1.20}$	Loam- Clay loam (لوم- لوم رسی)
$\Theta = 0.030 + 0.396 \times (h / 36.89)^{-1.07}$	Loam (لوم)
$\Theta = 0.031 + 0.419 \times (h / 36.89)^{-1.82}$	loam Clay (لوم رسی)
$\Theta = 0.376 \times (h / 31.89)^{-1.67}$	loam clay Sandy (لوم رسی شنی)
$\Theta = 0.446 \times (h / 52.03)^{-1.14}$	Clay (رسی)

بهترین برازش با داده‌های اندازه‌گیری شده، مربوط به معادله (۵) می‌باشد. لذا سعی شد یک رابطه کلی برای تمامی ۵۰ سری خاک مورد بررسی بین پارامترهای این معادله ( $D$ ,  $h_{min}$ ,  $\theta_s$ ) با میانگین هندسی ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) ذرات خاک بدست آید تا بتوان رابطه ساده‌تری برای تخمین منحنی مشخصه ارائه داد. با داشتن پارامترهای زود یافت خاک (درصد رس، درصد سیلت، و درصد شن)  $d_g$  و  $\sigma_g$  برای تمامی ۵۰ سری خاک مورد بررسی، محاسبه شد. رابطه بین هر کدام از پارامترها با  $d_g$  و  $\sigma_g$  از رگرسیون گیری چند متغیره با استفاده از نرم افزار Excel بدست آمد. روابط بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

$$D = 2.787 - 0.806d_g + 0.005\sigma_g, \quad r^2 = 0.575, \quad n = 50, \quad (13)$$

$$P_{(Intercept)} = 2.82 \times 10^{-57}, \quad P_{(d_g)} = 3.57 \times 10^{-8}, \quad P_{(\sigma_g)} = 0.001$$

$$\theta_s = 0.034\sigma_g, \quad r^2 = 0.572, \quad n = 50, \quad (14)$$

$$P_{(\sigma_g)} = 1.32 \times 10^{-10}$$

$$h_m = 76.56 - 171.76d_g - 1.75\sigma_g, \quad r^2 = 0.183, \quad n = 50, \quad (15)$$

$$P_{(Intercept)} = 1.05 \times 10^{-6}, \quad P_{(d_g)} = 0.008, \quad P_{(\sigma_g)} = 0.035$$

برای خاک های Sandy Clay loam (لوم رسی شنی) و Clay (رسی) معادله منحنی مشخصه برآورد شده با معادله (۶) مشابه با معادله منحنی مشخصه برآورد شده با معادله (۵) می باشد. برای مقایسه رطوبت‌های پیش‌بینی شده از تابع عمومی PSF (معادله (۴)) با حالت‌های خاص آن [معادلات (۵) و (۶)] ضریب توافق ( $d$ ) و جذر مربع میانگین خطاهای نرمال شده (NRMSE) محاسبه شد و نتایج نشان داد که در تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف استفاده از هر کدام از این معادلات به جای یکدیگر تفاوت ناچیزی در تخمین رطوبت خاک دارند (جدول ۱۰). از میان معادلات (۴)، (۵)، و (۶) کوچکترین NRMSE و



بدست آمد. معادلات تخمینی در جدول شماره ۶ ارائه شده است. در تحلیلی بدون توجه به بافت خاک، تمامی رطوبت‌های پیش‌بینی شده با پارامترهای زود یافت خاک و اندازه‌گیری با خط یک به یک مقایسه شدند (شکل ۲). نتایج آزمون F-Test در جدول شماره ۱۱، نشان داد تفاوت معنی‌داری بین رابطه  $\theta_m$  و  $\theta_p$  با خط یک به یک وجود نداشت.

برای بررسی صحت معادلات بدست آمده [معادله‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵)]، از داده‌های بانک اطلاعاتی UNSODA استفاده شد. به این صورت که با داشتن پارامترهای زود یافت خاک های UNSODA (درصد رس، درصد سیلت، و درصد شن)،  $d_g$  و  $\sigma_g$  خاک‌های مورد نظر بدست آمد. با قرار دادن  $d_g$  و  $\sigma_g$  هر کدام از خاک‌ها در معادلات (۱۳)، (۱۴) و (۱۵)، پارامترهای تخمینی معادله (۵) شامل  $D$ ،  $h_{min}$  و  $\theta_s$

جدول (۶): پارامترهای تخمینی معادله (۵)

معادله	بافت خاک
$\theta = 0.32 \times (h/38/29)^{-0.268}$	loam Sandy (لوم شنی)
$\theta = 0.50 \times (h/34/34)^{-0.216}$	Loam (لوم)
$\theta = 0.65 \times (h/28/14)^{-0.185}$	loam clay Sandy (لوم رسی شنی)
$\theta = 0.42 \times (h/46/62)^{-0.190}$	loam Silt (لوم سیلتی)
$\theta = 0.50 \times (h/42/28)^{-0.170}$	loam Clay (لوم رسی)
$\theta = 0.54 \times (h/46/50)^{-0.144}$	Clay (رسی)

جدول (۷): خلاصه آماری از تطبیق معادله (۴)

Texture (بافت)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		$\beta$		$h_{min}$ (cm)		D	
	میانگین ±SD †	حداکثر/حداقل ‡	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل
Sandy loam (لوم شنی)	۰/۰۱۰±۰/۴۱۵	۰/۴۲۳-۰/۴۰۸	۰/۰۳۹±۰/۳۷۴	۰/۴۰۲-۰/۳۴۶	۴/۰۰۵±۳۵/۰۶۱	۳۷/۸۹-۲۲/۲۳	۰/۰۹۸±۲/۶۹۴	۲/۷۶۴-۲/۶۲۴
Silt loam (لوم سیلتی)	۰/۰۰۶±۰/۵۰۱	۰/۵۰۶-۰/۴۹۷	۰/۰۱۰±۰/۴۷۸	۰/۴۸۶-۰/۴۷۱	۰/۰۷۸±۴۰/۸۰۲	۴۰/۸۵-۴۰/۷۴	۰/۰۵۵±۲/۷۵۸	۲/۷۹۷-۲/۷۱۹
Loam (لوم)	۰/۰۳۱±۰/۴۲۸	۰/۵۱۰-۰/۳۸۲	۰/۱۷۳±۰/۴۵۵	۰/۹۹۴-۰/۲۶۰	۸/۴۴۰±۳۶/۰۷۱	۵۹/۴۹-۲۱/۵۶	۰/۰۷۱±۲/۸۰۷	۲/۹۴۷-۲/۶۴۹
Clay loam (لوم رسی)	۰/۰۳۸±۰/۴۵۷	۰/۵۵۸-۰/۳۸۸	۰/۱۵۶±۰/۵۳۰	۰/۸۶۹-۰/۲۷۵	۸/۷۳۰±۳۸/۳۶۰	۵۱/۹۷-۱۳/۰۲	۰/۰۷۹±۲/۸۴۷	۲/۹۴۰-۲/۶۵۸
Loam-Clay loam (لوم-لوم رسی)	۰/۰۲۸±۰/۴۲۰	۰/۴۶۰-۰/۳۹۶	۰/۱۹۱±۰/۴۶۱	۰/۶۶۰-۰/۲۷۸	۲/۸۴۰±۳۹/۹۴۰	۴۲/۲۱-۳۶/۷۵	۰/۱۱۵±۲/۸۰۳	۲/۸۹۸-۲/۶۷۴
Sandy clay loam (لوم رسی شنی)	۰/۰۲۲±۰/۳۷۲	۰/۳۸۸-۰/۳۵۶	۰/۰۳۶±۰/۴۱۶	۰/۴۴۲-۰/۳۹۱	۰/۵۴۵±۳۱/۹۸۳	۳۲/۳۶-۳۱/۵۹	۰/۰۴۳±۲/۸۵۶	۲/۸۸۷-۲/۸۲۶
Clay (رس)	۰/۰۱۰±۰/۵۱۰	۰/۵۲۰-۰/۵۰۰	۰/۰۷۵±۰/۴۷۵	۰/۵۵۰-۰/۴۰۰	۰/۲۷۰±۵۲/۲۷۰	۵۲/۵۴-۵۲/۰۰	۰/۰۰۰±۲/۹۰۰	۲/۹۰۰-۲/۹۰۰

†Standard deviation (انحراف معیار).

‡Maximum and minimum values (بیشترین و کمترین مقدار).

جدول (۸): خلاصه آماری از تطبیق معادله (۵)

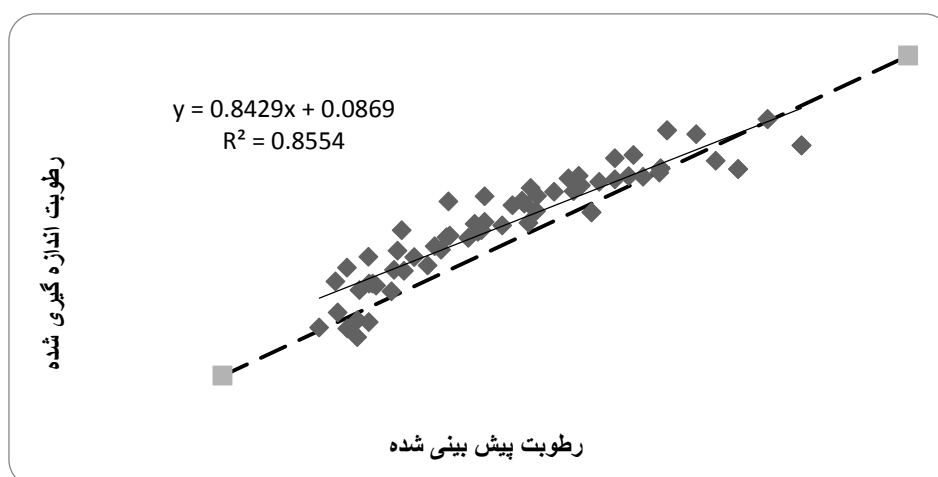
Texture (بافت)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		$h_{min}$ (cm)		D	
	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل
Sandy loam (لوم شنی)	۰/۰۱۶±۰/۴۱۲	۰/۴۲۴-۰/۴۰۰	۱۸/۷۷±۳۶/۲۵۳	۴۹/۵۳-۲۲/۹۷	۰/۰۲۵±۲/۷۶۶	۲/۷۸۴-۲/۷۴۸
Silt loam (لوم سیلتی)	۰/۰۲۲±۰/۴۹۴	۰/۵۱۰-۰/۴۷۸	۷/۷۹±۴۳/۵۰۹	۴۹/۰۲-۳۷/۹۹	۰/۰۳۱±۲/۷۷۰	۲/۸۰۲-۲/۷۵۷
Loam (لوم)	۰/۰۲۹±۰/۴۱۹	۰/۴۵۳-۰/۳۵۳	۱۳/۲۸±۳۹/۸۷۷	۶۷/۲۳-۲۰/۷۰	۰/۰۲۹±۲/۸۲۳	۲/۸۵۲-۲/۷۶۰
Clay loam (لوم رسی)	۰/۰۳۹±۰/۴۵۰	۰/۵۴۸-۰/۳۸۳	۱۰/۶۴±۴۱/۶۳۰	۶۶/۵۳-۲۰/۸۳	۰/۰۱۴±۲/۸۴۶	۲/۸۸۲-۲/۸۲۹
Loam-Clay loam (لوم-لوم رسی)	۰/۰۳۷±۰/۴۲۲	۰/۴۶۵-۰/۳۹۹	۶/۰۰±۳۷/۶۳۴	۴۳/۴۶-۳۱/۴۶	۰/۰۰۴±۲/۸۳۴	۲/۸۳۸-۲/۸۲۹
Sandy clay loam (لوم رسی شنی)	۰/۰۰۵±۰/۳۷۶	۰/۳۸۰-۰/۳۷۲	۷/۱۹±۳۱/۱۳۰	۳۶/۲۱-۲۶/۰۴	۰/۰۱۴±۲/۸۳۳	۲/۸۴۴-۲/۸۲۳
Clay (رس)	۰/۰۲۸±۰/۴۴۰	۰/۴۶۷-۰/۴۲۶	۰/۰۴±۵۲/۰۳۰	۵۲/۰۶-۵۲/۰۰	۰/۰۱۶±۲/۸۸۶	۲/۸۹۸-۲/۸۷۴

جدول (۹): خلاصه آماری از تطبیق معادله (۶)

Texture (بافت)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )		$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )			$h_a$ (cm)	D		$\lambda$	
	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل ل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل ل	میانگین ±SD	حداکثر/حداقل ل
Sandy loam (لوم شنی)	۰/۰۱±۰/۴۱	۰/۴۲-۰/۴۰	۰/۰۲±۰/۰۴	۰/۰۶-۰/۰۲	۴/۹۸±۳۷/۰۷	۴۰/۶۰-۳۳/۵۵	۰/۰۹±۲/۶۹	۲/۷۵-۲/۶۲	۰/۰۹±۰/۳۰	۰/۳۷-۰/۲۴
Silt loam (لوم سیلتی)	۰/۰۰±۰/۵۰	۰/۵۰-۰/۴۹	۰/۰۱±۰/۰۲	۰/۰۳-۰/۰۱	۰/۰۷±۴۱/۱۱	۴۱/۱۶-۴۱/۰۵	۰/۰۵±۲/۷۵	۲/۷۹-۲/۷۱	۰/۰۵±۰/۲۴	۰/۲۸-۰/۲۰
Loam (لوم)	۰/۰۳±۰/۴۲	۰/۴۹-۰/۳۷	۰/۰۴±۰/۰۳	۰/۱۲-۰/۰۰	۸/۰۹±۳۶/۸۹	۴۷/۷۶-۲۰/۷۹	۰/۰۵±۲/۷۹	۲/۸۵-۲/۶۴	۰/۰۵±۰/۲۰	۰/۳۵-۰/۱۴
Clay loam (لوم رسی)	۰/۰۳±۰/۴۵	۰/۵۴-۰/۳۸	۰/۰۵±۰/۰۳	۰/۱۷-۰/۰۰	۱۰/۲۵±۴۳/۷۷	۶۶/۵۳-۲۰/۸۳	۰/۰۵±۲/۸۱	۲/۸۸-۲/۶۵	۰/۰۵±۰/۱۸	۰/۳۴-۰/۱۱
Loam-Clay loam (لوم-لوم رسی)	۰/۰۳±۰/۴۳	۰/۴۶-۰/۴۰	۰/۰۶±۰/۰۴	۰/۱۱-۰/۰۰	۹/۱۰±۳۶/۲۹	۴۳/۴۵-۲۶/۰۴	۰/۰۹±۲/۷۸	۲/۸۳-۲/۶۷	۰/۰۹±۰/۲۲	۰/۳۲-۰/۱۶
Sandy clay loam (لوم رسی شنی)	۰/۰۰±۰/۳۷	۰/۳۸-۰/۳۷	۰/۰۰±۰/۰۰	۰/۰۰-۰/۰۰	۷/۱۹±۳۱/۱۳۰	۳۶/۲۱-۲۶/۰۴	۰/۰۱±۲/۸۳	۲/۸۴-۲/۸۲	۰/۰۱±۰/۱۶	۰/۱۷-۰/۱۵
Clay (رس)	۰/۰۲±۰/۴۴	۰/۴۶-۰/۴۲	۰/۰۰±۰/۰۰	۰/۰۰-۰/۰۰	۰/۰۴±۵۲/۰۳۰	۵۲/۰۶-۵۲/۰۰	۰/۰۱±۲/۸۸	۲/۸۹-۲/۸۷	۰/۰۱±۰/۱۱	۰/۱۲-۰/۱۰

جدول (۱۰): نتایج آماری از مقایسه معادله (۴) با معادلات (۵) و (۶)

بافت خاک	شماره معادله	RMSE	NRMSE	D
loam	(۴) و (۵)	۰/۰۲۱	۰/۰۶۹	۰/۹۹۴
(لوم)	(۴) و (۶)	۰/۰۱۶	۰/۰۵۶	۰/۹۹۶
Clay loam	(۴) و (۵)	۰/۰۲۹	۰/۰۹۹	۰/۹۷۷
(لوم رسی)	(۴) و (۶)	۰/۰۱۷	۰/۰۶۲	۰/۹۹۲
Sandy loam	(۴) و (۵)	۰/۰۱۲	۰/۰۵۴	۰/۹۹۵
(لوم شنی)	(۴) و (۶)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۱/۰۰۰
Silt loam	(۴) و (۵)	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۱/۰۰۰
(لوم سیلتی)	(۴) و (۶)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۱/۰۰۰
Clay	(۴) و (۵)	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۹۹۹
(رس)	(۴) و (۶)	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۰/۹۹۹
Loam- Clay loam	(۴) و (۵)	۰/۰۴۵	۰/۱۴۹	۰/۹۶۴
(لوم - لوم رسی)	(۴) و (۶)	۰/۰۳۰	۰/۱۰۳	۰/۹۸۵
Sandy clay loam	(۴) و (۵)	۰/۰۰۵	۰/۰۱۹	۰/۹۹۹
(لوم رسی شنی)	(۴) و (۶)	۰/۰۰۵	۰/۰۱۹	۰/۹۹۹



شکل (۲): مقایسه رابطه بین مقادیر پیش بینی شده رطوبت از معادلات بدست آمده و مقادیر رطوبت های اندازه گیری

UNSODA با خط یک به یک

جدول (۱۱): مقادیر تحلیل آماری F-Test برای مقادیر رطوبت پیش بینی شده از معادله ۵ و رطوبت‌های اندازه‌گیری شده

Line (خط)	Within (حدود)	d.f. (درجه آزادی)	$\sum x^2$	$\sum XY$	$\sum y^2$	Reg. Coef. (ضریب رگرسیون)	d.f. (درجه آزادی)	S.S. (مجموع مربعات)	M.S. (میانگین مربعات)
۱	خط (۱)	۶۴	۰/۹۵۴	۱/۱۳۱	۲/۰۰۷	۰/۸۴۲	۶۳	۰/۶۶۵	۰/۰۱۱
۲	خط (۲)	۶۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۰/۹۵۴	۱	۶۳	.	.

مقایسه شیب = F = N.S۳/۱۲۹ (غیر معنی‌دار)  
مقایسه عرض از مبدا = F = N.S۰/۶۸۴ (غیر معنی‌دار)

۱۵۰۰۰ سانتی متر را شامل می‌شود) و همچنین منحنی مشخصه شاخه خشک خاک ها، در محیط آزمایشگاهی اندازه گیری شده باشد. از آنجایی که داده‌های UNSODA، خاک Loam-Clay loam (لوم-لوم رسی) را شامل نمی‌شود لذا برای این خاک مقایسه ای صورت نگرفته است. در تحلیل آماری که برای معادله (۴) صورت گرفت نتایج به صورت زیر می‌باشد:

رطوبت‌های پیش‌بینی شده از معادله منحنی مشخصه بدست آمده از معادلات ۴، ۵ و ۶، برای هر دسته خاک با داده‌های بانک UNSODA، مورد مقایسه قرار گرفت. در این تحقیق تلاش بر این بوده که از بین داده های بانک UNSODA خاکی انتخاب شود که با شرایط ۵۰ سری خاک مورد بررسی تناسب داشته باشد. شرایطی مانند دامنه رطوبت خاک، دامنه مکش خاک (این دامنه بازه ی حداقل از ۵۰ تا

$$\Theta_m = 0.866\Theta_p, r^2 = 0.982, n = 9, \quad \text{Sandy loam (لوم شنی)} \quad (16)$$

$$\Theta_m = 1/0.12\Theta_p, r^2 = 0.980, n = 9, \quad \text{Silt loam (لوم سیلتی)} \quad (17)$$

$$\Theta_m = 0.922\Theta_p - 0.40, r^2 = 0.988, n = 9, \quad \text{Clay loam (لوم رسی)} \quad (18)$$

$$\Theta_m = 0.902\Theta_p, r^2 = 0.993, n = 11, \quad \text{Sandy clay loam (لوم رسی شنی)} \quad (19)$$

$$\Theta_m = 1/697\Theta_p - 0.316, r^2 = 0.861, n = \text{Clay (رس)} \quad (20)$$

$$\Theta_m = 1/242\Theta_p - 0.183, r^2 = 0.955, n = 1 \quad \text{Loam (لوم)} \quad (21)$$

تنها شیب و برای خاک‌های Clay loam (لوم رسی)، Clay (رس)، و Loam (لوم) هم شیب و هم عرض از مبدا معنی‌دار می‌باشند.

رطوبت‌های پیش بینی شده از معادله منحنی مشخصه بدست آمده از معادله (۵) و (۶) نیز برای هر دسته خاک با داده های بانک UNSODA، مورد

همان‌گونه که مشاهده می‌شود کم‌ترین مقدار برازش بین رطوبت‌های پیش بینی شده از معادله (۴) و داده‌های اندازه گیری با  $r^2=0.861$  مربوط به خاک Clay می‌باشد. بهترین برازش نیز با  $r^2=0.993$  مربوط به خاک Sandy clay loam (لوم رسی شنی) می‌باشد. برای خاک های Sandy loam (لوم شنی)، Silt loam (لوم سیلتی)، و Sandy clay loam (لوم رسی شنی)

مقایسه قرار گرفت. در تحلیل آماری که برای معادله (۵) صورت گرفت نتایج به صورت زیر می باشد:

$$\Theta_m = 0.909\Theta_p, r^2 = 0.988, n = 9, \quad \text{Sandy loam (لوم شنی)} \quad (22)$$

$$\Theta_m = 1.016\Theta_p, r^2 = 0.982, n = 9, \quad \text{Silt loam (لوم سیلتی)} \quad (23)$$

$$\Theta_m = 0.864\Theta_p, r^2 = 0.998, n = 9, \quad \text{Clay loam (لوم رسی)} \quad (24)$$

$$\Theta_m = 0.915\Theta_p, r^2 = 0.992, n = 11, \quad \text{Sandy clay loam (لوم رسی شنی)} \quad (25)$$

$$\Theta_m = 1.009\Theta_p - 0.32, r^2 = 0.829, n = 10, \quad \text{Clay (رس)} \quad (26)$$

$$\Theta_m = 1.091\Theta_p - 0.11, r^2 = 0.960, n = 11, \quad \text{Loam (لوم)} \quad (27)$$

Loam- Clay loam (لوم رسی) می باشد. برای خاک Clay loam (لوم- لوم رسی) از مکش های فرضی استفاده گردید. در تحلیل آماری که برای معادله (۶) صورت گرفت نتایج به صورت زیر می باشد:

کمترین مقدار برازش شده بین رطوبت های پیش بینی شده با معادله (۵) و رطوبت های اندازه گیری مربوط به خاک Clay (رس) می باشد که این نتیجه برای معادلات (۴) و (۶) نیز صادق است. بهترین مقدار برازش نیز با  $r^2=0.998$  مربوط به خاک

$$\Theta_m = 0.872\Theta_p, r^2 = 0.982, n = 9, \quad \text{Sandy loam (لوم شنی)} \quad (28)$$

$$\Theta_m = 1.011\Theta_p, r^2 = 0.979, n = 9, \quad \text{Silt loam (لوم سیلتی)} \quad (29)$$

$$\Theta_m = 0.822\Theta_p, r^2 = 0.873, n = 9, \quad \text{Clay loam (لوم رسی)} \quad (30)$$

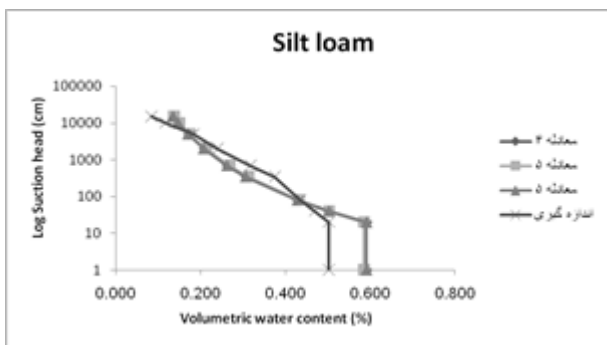
$$\Theta_m = 0.915\Theta_p, r^2 = 0.992, n = 11, \quad \text{Sandy clay loam (لوم رسی شنی)} \quad (31)$$

$$\Theta_m = 1.009\Theta_p - 0.32, r^2 = 0.829, n = 10, \quad \text{Clay (رس)} \quad (32)$$

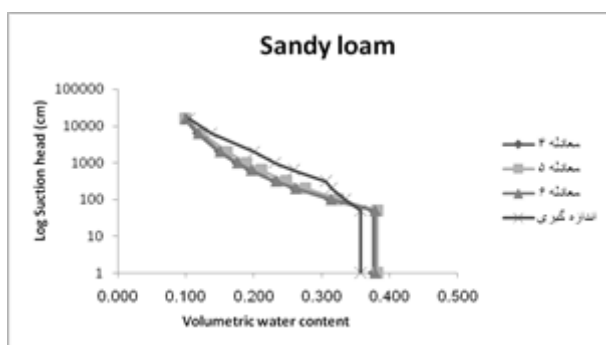
$$\Theta_m = 1.134\Theta_p - 0.13, r^2 = 0.950, n = 11, \quad \text{Loam (لوم)} \quad (33)$$

رطوبت‌های پیش‌بینی شده با معادلات مورد بررسی مقادیری کمتر از مقادیر اندازه‌گیری را نشان می‌دهند. برای خاک Silt loam (لوم سیلتی) (شکل ۴) نیز روند طی شده به همین صورت است با این تفاوت که از مکش ۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰  $\Theta_m < \Theta_p$  می‌باشد. برای خاک‌های Loam (شکل ۸) و Clay loam (لوم رسی) (شکل ۵) در تمامی مکش‌ها  $\Theta_m > \Theta_p$  می‌باشد. برای خاک Sandy Clay Loam (لوم رسی شنی) نیز از مکش ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر  $\Theta_m > \Theta_p$  می‌باشد.

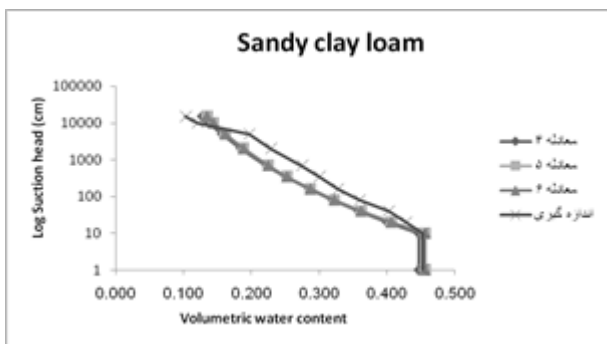
بزرگ‌ترین مقدار برازش مربوط به خاک Sandy clay loam (لوم رسی شنی) می‌باشد که این نتیجه برای معادله (۴) نیز صادق می‌باشد. در شکل‌های ۳ تا ۸ رطوبت اندازه‌گیری شده و به دست آمده با هریک از معادلات (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. در شکل ۲ برای خاک Sandy loam (لوم شنی) و شکل ۶ برای خاک Clay (رسی) دیده می‌شود که بترتیب تا مکش ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر رطوبت پیش‌بینی شده  $(\Theta_p)$  با معادلات (۴)، (۵) و (۶) بیشتر از رطوبت‌های اندازه‌گیری  $(\Theta_m)$  می‌باشد و از آن مکش به بعد



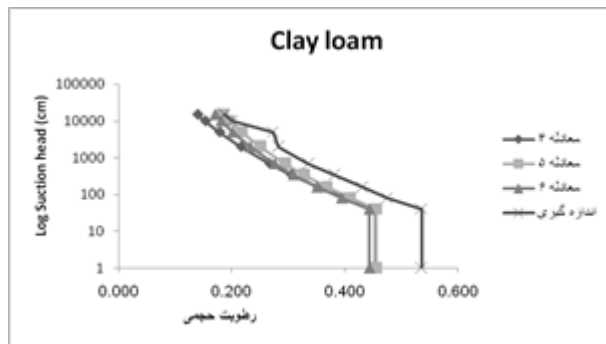
شکل (۴): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵) و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Silt loam



شکل (۳): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵) و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Sandy loam



شکل (۶): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵) و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Sandy Clay loam

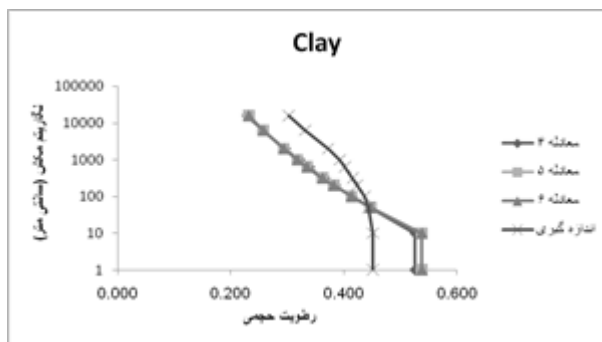


شکل (۵): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵) و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Clay loam

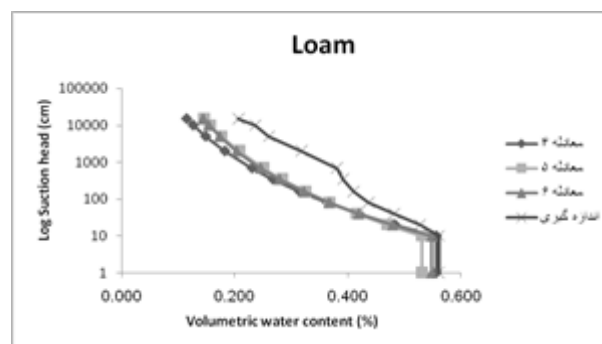
### نتیجه‌گیری:

در مقایسه با مدل عمومی PSF و حالت‌های خاص آن، برای تخمین منحنی مشخصه خاک‌ها، استفاده از مدل Tyler- Wheatcraft (1990) برآزش بهتری را نشان داد. برای تعیین حداقل مکش و رطوبت اشباع خاک استفاده از هر کدام از معادلات PSF، Tyler- Wheatcraft و Brooks- Corey تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. برای تخمین رطوبت اشباع استفاده از هر کدام از مدل‌های PSF، Tyler- Wheatcraft و Brooks- Corey تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. برای تخمین بعد فرکتال استفاده از مدل‌های

Tyler- Wheatcraft توصیه می‌شود. با استفاده از پارامترهای زود یافت خاک رابطه ای میان میانگین هندسی ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) ذرات خاک و  $h_{min}$  و  $\theta_s$  و  $D$  بدست آمد. با داشتن این معادلات تجربی معادله منحنی مشخصه تخمین زده شد و با خاک‌های بانک UNSODA مقایسه شد. بدون توجه به بافت خاک، تمامی رطوبت‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با خط یک به یک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین رطوبت‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با خط یک به یک وجود ندارد.



شکل (۷): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵)، و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Clay loam



شکل (۸): منحنی مشخصه آب خاک پیش‌بینی شده با معادلات (۴)، (۵)، و (۶) در مقایسه با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده خاک UNSODA برای خاک Loam

### منابع

- خشنودی یزدی، ا. ۱۳۷۰. برآورد منحنی رطوبتی خاک از روی خصوصیات فیزیکی در برخی از خاک‌های ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بخش خاکشناسی. دانشگاه تهران. ۱۴۰ صفحه.
- خشنودی یزدی، ا. ب. قهرمان. ۱۳۸۳. بررسی روابط بافت خاک و پارامتر مقیاس‌بندی برای برآورد رطوبت خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. جلد ۵، شماره ۲۰، ص ۱۷-۳۴.
- سپاسخواه، ع. ر. ۱۳۸۰. نامه فرهنگستان علوم، دوره: ۶، شماره: ۱۷، ص. ۱۴۷ تا ۱۶۹.

Bird, N., E. Perrier and M. Rieu. 2000. The water retention curve for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. Eur. J. Soil Sci. 55:55-63.



- Bittelli, M., G. S. Campbell, and M. Flury. 1999. Characterization of particle-size distribution in soil with a fragmentation model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:782–788.
- Brooks, R. H., and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Paper No. 3*, Colorado State Univ. Fort Collins, CO, USA.
- Ersahin, S., H. Gunal., T. Kutlu., B. Yetgin and S. Cuban. 2006. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle- size distribution. *Geoderma*, 136 :588- 597.
- Medina, H., M. Tarawally, A. Del Valle and M. Ruiz. 2006. Estimating soil water retention curve in rhodicferralsols from basic soil data. *Geoderma*, 108:277- 285.
- Perfect, E., and B. D. Kay. 1991. Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1552–1558.
- Perrier, E. and N. Bird. 2002. Modeling soil fragmentation: The pore solid fractal approach. *Soil Tillage Res.* 64:91–99.
- Perrier, E., N. Bird and M. Rieu. 1999. Generalizing the fractal model of soil structure: The PSF approach. *Geoderma*, 88:137-164.
- Rieu, M., and G. Sposito. 1991. Fractal Fragmentation, soil porosity, and soil water properties. I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1231-1238.
- Turcotte, D. L. 1986. Fractals and fragmentation. *J. Geophys. Res.* 91:1921–1926.
- Tyler, S. W. and S. W. Wheatcraft. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resour. Res.* 26:1047–1054.

## Evaluation three fractal model to determine soil water retention curve

P. kahkhamoghadam<sup>1</sup>, A. R. sepaskhah<sup>2</sup>

### Abstract

Soil hydraulic parameters (soil water retention curve) is a fundamental soil property employed to quantify plant available water and for modeling water and solute movement in soils that the determination of this property via direct methods is expensive and time consuming. For solve this problem Indirect methods have been proposed that fractal analysis is one of the methods. Pore- Solid Fractal model was used for modeling soil structure and soil water retention function by many researchers. PSF model is a public expression for maintenance function soil water that is provided by other researchers in special form. The aim of this study was to assess PSF public function based on fractal dimension of soil water suction data and comparison with Brooks-Corey and Tyler-Wheatcraft models. In this study, with using laboratory data from unpublished sources, obtained soil water retention curve for soils under investigation by the PSF, special cases (Brooks-Corey and Tyler-Wheatcraft). To verify the results, a comparison between the predicted and measurement soil water content for many soil of UNSODA database. The results showed that for the soils investigated Tyler-Wheatcraft function were better match in compared with the PSF and the Brooks-Corey function. To calculate the intake air ( $h_{min}$ ) and soil saturation ( $\theta_s$ ), using any of the equations PSF, and Tyler and Wheatcraft, and Brooks-Corey not significantly different from each other. But for calculating the fractal dimension (D) using Eq Tyler-Wheatcraft was recommended. Empirical simple models was developed with ready available data by relationship between the geometric mean (dg) and geometric standard deviation ( $\sigma_g$ ) with  $h_{min}$ ,  $\theta_s$  and  $D$ . Then, soil water retention curve was calculated For many soil of UNSODA database. Regardless texture soil, all predicted and measured volumetric soil moisture were compared with a one-to-one. The result showed no significant difference between the predicted moisture content ( $\theta_p$ ) and measured ( $\theta_m$ ) with a one-to-one. So it seems that the empirical simple model is able to estimate soil water retention curve with reasonable accuracy.

**Key words:** fractal dimension, soil water retention curve, texture soil.

<sup>1</sup> Lecturer of water and soil Department, zabol university, 09155441540, [keykhamoghadam.parisa@gmail.com](mailto:keykhamoghadam.parisa@gmail.com) .

<sup>2</sup> Professor, Water Engineering Department, shiraz University , [sepas@shiraz.ac.ir](mailto:sepas@shiraz.ac.ir).